



ISSN 0555-2648

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 3 (97)

2013 г.



МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 3 (97)

Издается с июня 1937 г.

Санкт-Петербург
ААНИИ
2013

Главный редактор

д-р геогр. наук, профессор *И.Е.Фролов* (ААНИИ)

Редакционная коллегия

канд. физ.-мат. наук *А.И.Данилов* (зам. главного редактора)

канд. геогр. наук *И.В.Бузин*

(ученый секретарь, тел. (812) 337-3212, e-mail: buzin@aari.ru)

А.А.Меркулов

(секретарь, тел. (812) 337-3135, e-mail: aam@aari.ru)

д-р геогр. наук *Г.В.Алексеев* (ААНИИ)

канд. физ.-мат. наук *Л.П.Бобылев* (Фонд Нансен-центр)

д-р геогр. наук *В.С.Вуглинский* (ГГИ)

канд. геол.-минерал. наук *Г.Э.Грикуров* (ВНИИОкеангеология)

д-р геогр. наук *З.М.Гудкович* (ААНИИ)

д-р геогр. наук *Г.К.Зубакин* (ААНИИ)

д-р геол.-минерал. наук *В.Л.Иванов* (ВНИИОкеангеология)

д-р физ.-мат. наук *В.М.Катцов* (ГТО)

канд. геогр. наук *В.Я.Липенков* (ААНИИ)

канд. техн. наук *В.А.Лихоманов* (ААНИИ)

д-р физ.-мат. наук *А.П.Макишас* (ААНИИ)

канд. биол. наук *А.В.Неелов* (ЗИН РАН)

канд. геогр. наук *В.Ф.Радионых* (ААНИИ)

д-р физ.-мат. наук *В.А.Рожков* (СПбГУ)

д-р геогр. наук *Л.М.Саватюгин* (ААНИИ)

д-р физ.-мат. наук *Л.А.Тимохов* (ААНИИ)

д-р физ.-мат. наук *О.А.Трошичев* (ААНИИ)

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 3 (97)

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-35144 от 28 января 2009 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций
В соответствии с решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от
19 февраля 2010 года № 6/6 журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и
изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание
ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписные индексы издания в каталоге «Газеты. Журналы» ОАО «Агентство Роспечать»

70279 – на год

48657 – для индивидуальных подписчиков (на полгода)

70278 – для предприятий и организаций (на полгода)

Литературный редактор: Е.В.Миненко

Оригинал-макет: А.А.Меркулов

На обложке рисунок А.М.Козловского

ISSN 0555-2648

© Государственный научный центр РФ
Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт
(ГНЦ РФ ААНИИ), 2013

СОДЕРЖАНИЕ

<i>В.П.Карклин, И.Д.Карелин, А.В.Юлин, Е.А.Усольцева. Особенности формирования припая в море Лаптевых</i>	<i>5</i>
<i>Е.И.Макаров. Применение системных методов для составления специализированных прогнозов ледовых условий плавания</i>	<i>15</i>
<i>В.Ю.Третьяков, С.В.Фролов. Модель оценки рисков транспортных операций в условиях ледяного покрова</i>	<i>21</i>
<i>В.Е.Федяков, С.В.Фролов. Новые алгоритмы учета влияния ледяных образований на надежность движения судов во льдах.....</i>	<i>28</i>
<i>С.В.Фролов. Влияние ориентации нарушений сплошности льда на эффективность движения судов в Арктическом бассейне в летний период</i>	<i>35</i>
<i>Л.Г.Цой, А.В.Андрюшин, А.А.Штрек. Обоснование основных параметров перспективных крупнотоннажных газовозов для Арктики</i>	<i>46</i>
<i>Н.А.Крупина, В.А.Лихоманов, А.В.Чернов. Оценка ледовой ходкости НЭС «Академик Трёшников»</i>	<i>57</i>
<i>Г.К.Зубакин, Н.Е.Иванов, А.В.Нестеров. Оценки изменчивости скорости дрейфа айсбергов и градиента атмосферного давления в северо-восточной части Баренцева моря.....</i>	<i>65</i>
<i>Н.Э.Демидов, С.Р.Веркулич, О.В.Занина, Е.С.Караевская, З.В.Пушина, Е.М.Ривкина, Д.Г.Шмелев. Конечная морена и озерно-лагунные отложения в разрезе четвертичных отложений оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида</i>	<i>79</i>
<i>А.В.Баранская, Д.Ю.Большаинов, Ю.И.Кучанов, В.М.Томашунас. Новые данные о дислокациях в четвертичных отложениях полуостровов Ямал и Гыдан и связанных с ними новейших тектонических движениях по результатам экспедиции «Ямал–Арктика-2012».....</i>	<i>91</i>
<i>Е.А.Гусев, Д.Ю.Большаинов, В.А.Дымов, В.В.Шарин, Х.А.Арсланов. Голоценовые морские террасы южных островов Земли Франца-Иосифа</i>	<i>103</i>
<i>СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ</i>	
<i>Л.М.Саватюгин, И.Н.Сократова. Открытию архипелага Северная Земля – 100 лет: история и перспективы научных работ</i>	<i>109</i>
<i>Г.Д.Бурков. К 100-летию со дня рождения П.А.Гордиенко</i>	<i>114</i>
<i>В.В.Иванов. К 100-летию со дня рождения А.А.Гирса.....</i>	<i>116</i>

CONTENTS

<i>V.P.Karklin, I.D.Karelin, A.V.Yulin, E.A.Usoltseva.</i> Peculiarities of the landfast ice formation in the Laptev Sea.....	5
<i>E.I.Makarov.</i> Application of systemic methods to produce specialized ice forecasts.....	15
<i>V.Yu.Tretyakov, S.V.Frolov.</i> Model of an estimation of navigation risks in drifting ice ..	21
<i>V.E.Fedyakov, S.V.Frolov.</i> The new algorithms of statistical modeling to describe possible changes of difficulties appeared during the ice navigation are presented in the article	28
<i>S.V.Frolov</i> Orientation of the leads and cracks in the ice cover relatively to direction of the ship movement is the most important characteristic of ice navigation in the Arctic Basin.....	35
<i>L.G.Tsoy, A.V.Andryushin, A.A.Shtrek.</i> Substantiation of principal parameters of prospective large capacity lng carriers for the Arctic	46
<i>N.A.Krupina, V.A.Likhomanov, A.V.Chernov.</i> Estimation of ice capability of research vessel «Akademik Tryoshnikov»	57
<i>G.K.Zubakin, N.E.Ivanov, A.V.Nesterov.</i> Variability estimates of iceberg drift speed and pressure gradient in the north-eastern Barents sea.....	65
<i>N.E.Demidov, S.R.Verkulich, O.V.Zanina, E.S.Karaevskaya, Z.V.Pushina, E.M.Rivkina, D.G.Shmelev.</i> The end moraine and lacustrine-marine sediments in the cross-section of quaternary deposits of the Larsemann Hills, East Antarctica.....	79
<i>A.V.Baranskaya, D.Yu.Bolshiyarov, Yu.I.Kuchanov, V.M.Tomashunas.</i> New data on neotectonic movements and dislocations in Quaternary sediments of the Yamal and Gydan Peninsula based on the results of the «Yamal–Arctic-2012» Expedition ...	91
<i>E.A.Gusev, D.Yu.Bolshiyarov, [V.A.Dymov], V.V.Sharin, Kh.A.Arslanov.</i> Holocene marine terraces of Franz Jozef Land Southern Islands	103
<i>PAGES OF HISTORY</i>	
<i>L.M.Savatyugin, I.N.Sokratova.</i> 100-years anniversary of the discovery of the Severnaya Zemlya archipelago: History and the prospects of scientific research..	109
<i>G.D.Burkov</i> On the occasion of the centenary of the birth of P.A.Gordienko	114
<i>V.V.Ivanov.</i> On the occasion of the centenary of the birth of A.A.Girs	116

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИПАЯ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

канд. геогр. наук В.П.КАРКЛИН, канд. геогр. наук И.Д.КАРЕЛИН,
канд. геогр. наук А.В.ЮЛИН, мл. науч. сотр. Е.А.УСОЛЬЦЕВА

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: karklin@aari.ru, icefor@aari.ru

Вследствие отсутствия регулярных наблюдений за припаем в период до начала использования спутникового мониторинга ледяного покрова некоторые важные режимные особенности формирования припая моря Лаптевых ранее не были исследованы. В статье приведено сезонное положение границ припая в море с момента его образования до максимального развития, которое может наблюдаться с различной степенью повторяемости в любой из зимних месяцев с февраля по май. Припай в море Лаптевых формируется в условиях преобладания отжимных ветровых потоков, и ежегодное его разрастание происходит не постепенно, а «скачкообразно» или «ступенчато», и его площадь и ширина в течение нескольких дней могут увеличиться в несколько раз. Дано объяснение механизма такой особенности формирования припая.

Ключевые слова: припай, границы припая, площадь и ширина припая, отжимные и нажимные ветры, «ступенчатое» разрастание припая, стамухи.

Припайные (неподвижные, скрепленные с берегом) льды являются характерной особенностью ледового ландшафта арктических морей в зимний период. Припай образуется вдоль всего материкового и островного побережий арктических морей.

Наблюдения за припаем начались со времени создания сети полярных станций в Арктике (в 1930-х гг.). Данные наблюдений полярных станций явились основными для исследования режимных характеристик припайных льдов, таких как сроки образования и разрушения припая, нарастание его толщины. Недостаток сведений о распространении припайных льдов вследствие ограниченности пространств, обозреваемых с пунктов ледовых наблюдений полярных станций, восполнялся данными визуальных ледовых авиационных разведок в открытом море. Ледовые авиационные разведки были основным средством наблюдения за распространением припая, положением его границ и определения таких характеристик припайного льда, как торосистость, возраст льда, заснеженность, разрушенность и другие [Руководство..., 1981].

Авиационные разведки выполнялись начиная с конца февраля (то есть после окончания полярной ночи) и заканчивались осенью. В течение полярной ночи (конец ноября, декабрь, январь и большая часть февраля) ледовые разведки не производились, и данные о ледовых условиях в открытом море за это время практически отсутствуют или их крайне мало, поэтому особенности распространения припая и положение его границ в эту продолжительную часть зимнего периода не определялись.

Сведения о припае арктических морей содержатся в работах отечественных исследователей [Зубов, 1945; Карелин, 1945, 1949; Гордиенко, 1971; Гудкович и др., 1972; Захаров, 1982; Горбунов и др., 1983; Бородачев, 1998].

Наиболее обстоятельное специальное исследование режима припайных льдов арктических морей выполнено П.А.Гордиенко [Гордиенко, 1971]. Для этого им использованы данные наблюдений на полярных станциях, авиационных ледовых разведок, а также данные экспедиционных исследований за период до 1970 г. В его работе дан анализ влияния гидрографических и гидрометеорологических факторов, участвующих в образовании и разрушении припая, а также приводятся оценки влияния самого припая на навигационные условия плаваний по трассам Северного морского пути.

В работах [Зубов, 1945] и [Гордиенко, 1971] введено понятие припайных зон. Эти зоны характеризуются развитой береговой линией, наличием островов и мелководий, способствующих нагромождению льда в виде стамух, удерживающих припай. Основные зоны с наиболее развитым припаем располагаются в северо-восточной части Карского моря, в восточной части моря Лаптевых и в западной части Восточно-Сибирского моря. Последние две зоны располагаются вокруг Новосибирских островов. Припай этого района – самый мощный, его суммарная площадь в период максимального сезонного развития в среднем достигает около 330000 тыс. км², что составляет более половины суммарной площади припая всех арктических морей сибирского шельфа.

Припайная (южная и юго-восточная) зона моря Лаптевых характеризуется чрезвычайно неровным дном со множеством банок, где глубины не превышают 5 м.

Регулярные наблюдения за припаем в течение всего осенне-зимнего и весеннего периодов стали возможными с началом спутниковой эпохи. Ледовые карты, создаваемые в ААНИИ по данным ИСЗ в масштабе 1:5 000 000, позволяют оценить с декадной дискретностью положение границ припая, его ширину на репрезентативных створах и приращение его площадей за весь период от начала его становления до окончательного разрушения. Обобщенные сведения об этих характеристиках припая в районах арктических морей за период 1980–2011 гг. содержатся в недавно опубликованной работе [Карелин, Карклин, 2012].

В настоящей статье для характеристики особенностей формирования припая в море Лаптевых использованы данные для периода его нарастания (октябрь–май) по данным спутниковых наблюдений за период 1980–2012 гг.

Припай моря Лаптевых является наиболее развитым в арктических морях сибирского шельфа и уступает по площади только припаю Восточно-Сибирского моря. При этом площадь припая в меньшей степени подвержена влиянию межгодовых колебаний гидрометеорологических условий в период его наибольшего развития, чем припай в Восточно-Сибирском и Карском морях. Так, за весь период наблюдений максимальная площадь припая превышает его минимальную площадь в Восточно-Сибирском море в 2,2 раза, в Карском море – в 3,5 раза, а в море Лаптевых – только в 1,2 раза.

В среднем в период максимального сезонного развития припай занимает около 39 % акватории моря Лаптевых. Большая часть припайного льда образуется в восточной части моря (к востоку от 125° в.д.), его площадь составляет около 70 % от общей площади припая в море. Ширина припая вдоль Североземельского архипелага и Таймырского побережья в среднем равна 35 км, что составляет (в пересчете на протяженность побережья) около 38 % от площади припая западной части моря, и, следовательно, 62 % припая этой части моря образуется вдоль южного побережья. Таким образом, в южной и юго-восточной части моря формируется почти 90 % припая моря Лаптевых, что в среднем составляет около 190 тыс. км² (рис. 1).

По данным полярных станций, в среднем через 10–15 суток после начала устойчивого ледообразования припай появляется на мелководьях, в закрытых бухтах и заливах в виде ледяных заберегов. Его образование становится возможным при достижении молодым льдом толщины 5–10 см.

В табл. 1 приведены повторяемости сроков образования припая в прибрежных районах моря Лаптевых. Они определены по времени появления минимальной ширины припая на репрезентативных створах. В масштабе карты 1:5 000 000 определенный таким способом срок (с точностью до декады) является сроком появления устойчивого припая, поскольку его ширина уже составляет не менее 1,5 км. Тем не менее, эта дата позволяет составить представление о пространственно-временном характере начальной стадии формирования припая.

Наиболее раннее становление припая в море Лаптевых наблюдается в третьей декаде сентября вдоль побережий Североземельского архипелага и Таймырского полуострова (табл. 1). Раннее образование припая в этих районах, как правило, связано с наличием не вытаявших за лето льдов Таймырского ледяного массива и, как следствие, ранним началом устойчивого ледообразования, вслед за которым начинает устанавливаться припай. В остальных районах моря припай образуется на чистой воде.

В большинстве районов моря Лаптевых припай начинает образовываться в одной из декад октября (чаще всего в третьей). Поздние сроки в этих районах приходятся на первую половину ноября (табл. 1). Исключения составляют мелководные районы, распресненные речными водами рек Лены и Яны (Ленское взморье и Янский залив). Здесь припай образуется всегда в октябре (преимущественно во второй его декаде).

Таблица 1

Повторяемость сроков образования припая у побережий моря Лаптевых за период 1980–2010 гг.

Районы	Месяцы		
	IX	X	XI
Североземельское побережье	10	72	18
Таймырское побережье	7	86	7
Анабаро-Оленёкское побережье	–	80	20
Ленское взморье	–	100	–
Залив Буор-Хая	–	87	13
Янский залив	–	100	–
Побережье Новосибирских островов	–	87	13

На первой стадии припайные льды образуются при смерзании начальных и молодых видов дрейфующих льдов на прибрежном мелководье глубиной примерно до 5 м, где естественные неровности суши способствуют сцеплению молодых льдов с берегом. По мере увеличения толщины льда, граница припая смещается в открытые районы моря и при средних условиях достигает максимально удаленного от побережий положения в марте–апреле. К этому времени граница припая удаляется от вершины Янского залива в северо-западном направлении на 450 км и на 160–170 км – от вершины Оленёкского залива (рис. 1).

Как можно видеть из рис. 1, наиболее интенсивно припай в море развивается в течение ноября–января, затем его развитие замедляется. В средние годы в марте–апреле припай уже полностью сформирован. Как можно видеть из табл. 2, площадь

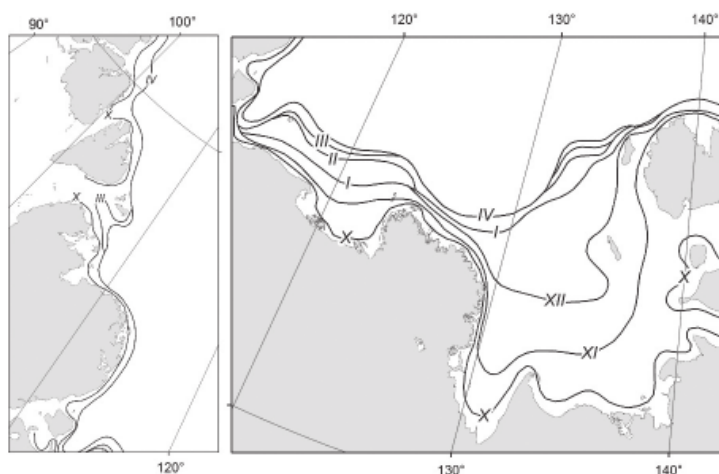


Рис. 1. Среднее положение границ припая в море Лаптевых в период его формирования (слева – Североземельское и Таймырское побережья, справа – южная и юго-восточная часть).

Таблица 2

Средние и экстремальные величины площадей припая в море Лаптевых в конце месяцев периода его формирования по данным ИСЗ за 1980–2012 гг., тыс. км²

Месяц	Запад моря			Восток моря			Все море		
	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.
X	11,6	3,4	29,3	19,3	3,9	108,2	30,9	9,3	115,8
XI	26,6	14,4	43,4	54,1	9,8	135,1	80,7	29,8	158,7
XII	37,6	20,9	57,3	100,4	26,3	145,4	138,0	61,8	189,4
I	45,9	33,5	62,4	138,3	100,3	156,0	184,2	153,8	204,7
II	51,8	33,5	63,4	148,5	126,3	159,6	200,4	171,5	219,4
III	57,1	39,4	77,0	150,5	136,8	162,2	207,6	178,8	231,4
IV	59,6	42,2	84,2	151,4	138,0	163,2	210,8	185,8	231,2
V	58,2	44,4	84,0	151,3	143,6	162,2	209,5	193,2	231,1

припая в районах моря к этому времени близка к стабилизации, и его дальнейшее распространение в море прекращается.

При некоторых благоприятных условиях (слабоветрие, спокойное море) площадь припая в начальный период формирования в октябре–ноябре может быть равна его площади при средних условиях формирования или превосходить ее. Это особенно характерно для восточного района моря (табл. 2). Однако, по данным полярных станций, к этому времени толщина молодых льдов в среднем достигает возраста серого, серо-белого (10–15, 15–30 см соответственно). Припай из молодых льдов взламывается даже при незначительных внешних воздействиях (изменения уровня моря, ветра, волнения и зыби). Неустойчивость припая в этот период проявляется в сезонных изменениях стандартного отклонения, величина которого максимальна в ноябре и постепенно уменьшается к январю по мере увеличения площади и устойчивости припая (рис. 2).

Как уже отмечалось выше, в период развития припай моря Лаптевых наиболее устойчив (по сравнению с припаем в других морях) к межгодовым колебаниям ги-

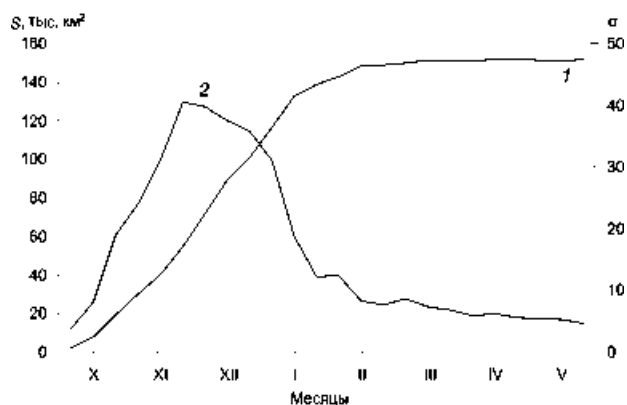


Рис. 2. Изменения средней площади припая в восточной части моря Лаптевых (1) и их стандартного отклонения (2) в период нарастания припая.

дрометеорологических условий. Как можно заключить из табл. 2, в апреле, при достижении максимального развития, превышение экстремальной величины суммарной площади припая в море над средней его величиной составляет около 20 тыс. км², или 10 %, в восточной части моря – около 8 %. Менее устойчив припай в западной части моря, где при средней площади припая, равной 59,6 тыс. км², многолетний размах колебаний составляет 42 тыс. км², или около 70 % от средней величины.

Положение границ припая при различной степени его развития в южных районах моря Лаптевых в конце периода его формирования представлено на рис. 3. На западе и востоке района граница припая при максимальном его развитии смещается в море приблизительно на 170 км относительно границы минимального развития. В центральной части района, между меридианами 125° и 130° в.д., смещение составляет около 75 км. Здесь расширение припая сдерживается увеличением глубин до 30–40 м.

Сопоставление положения границ припая в апреле с батиметрическими условиями в южной части моря Лаптевых показывает, что минимальная граница не выходит

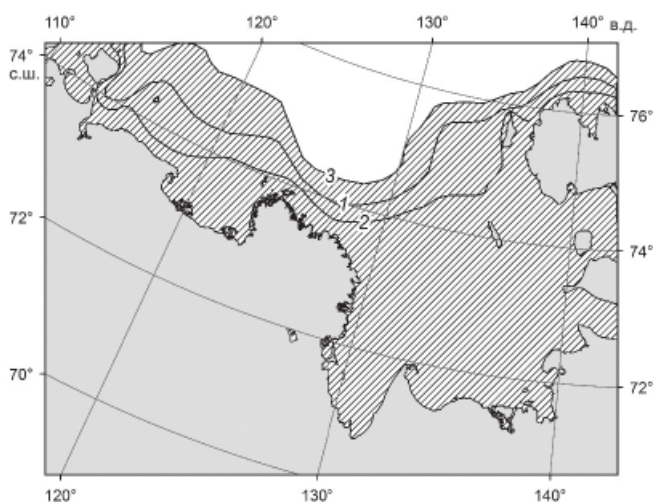


Рис. 3. Положение границ припая в южной и юго-восточной части моря Лаптевых при среднем (1), минимальном (2) и максимальном (3) развитии припая в апреле.

за пределы 10-метровых глубин, пересекая при этом банки и отмели с глубинами от 5 м и менее. Средняя граница припая также в основном проходит по глубинам около 10 м, местами 15 м, и только на востоке, в районе островов Столбовой и Бельковский, глубины увеличиваются до 20 м. Максимальная граница распространения припая не выходит за пределы 20–25-метровых глубин.

Как известно [Карелин, 1945, 1949; Гордиенко, 1971], глубины 20–25 м во всех районах арктических морей являются предельными для распространения припая. Объяснение этому феномену предложено в работе З.М.Гудковича [Гудкович, 1974]. Вследствие трансформации приливной волны в прибрежной зоне при переходе от сизигии к квадратуре амплитуда прилива уменьшается в 2–2,5 раза, и напряжения в ледяном покрове достигают предельных значений в районе изобаты 20–25 м. Кроме того, в мористой зоне припая образуются ослабленные сечения из-за включения в него более молодых льдов, что приводит к частичному отрыву припая при сильных отжимных ветрах. Расчеты показывают, что минимальная толщина льда, способная противостоять ветру скоростью 20 м/с, в арктических морях должна быть не менее 3 м [Гудкович, 1974]. Как известно, лед такой толщины не наблюдается даже в прибрежной зоне. Толщина льда вблизи кромки припая не превышает 1,5–2 м.

Очевидно, что совместное влияние тангенциальных сил ветра и приливо-отливных явлений на припай ограничивает его распространение глубинами 20–25 м.

Вследствие отсутствия регулярных наблюдений за припаем в период до начала использования спутникового мониторинга ледяного покрова некоторые важные режимные особенности его формирования не были исследованы.

В более ранних работах [Карелин, 1945; Гордиенко, 1971] отмечалось, что максимального развития припай в море Лаптевых достигает в мае. Как следует из ежедекадных данных о площадях припая, рассчитанных на основе наблюдений ИСЗ за последние десятилетия, максимального развития припай может достигнуть с различной степенью повторяемости в любой из зимних месяцев с февраля по май, после чего его площадь не увеличивается (табл. 3). В целом для моря в 80 % случаев максимального развития припай достигает в апреле–мае с почти одинаковой повторяемостью в эти месяцы. В районах моря максимальный припай может сформироваться в любой из четырех месяцев (табл. 3).

Таблица 3

**Повторяемость случаев максимального развития припая в море Лаптевых
в зимние месяцы 1980–2012 гг., %**

Районы моря	Месяцы			
	II	III	IV	V
Восточная часть	18	33	19	30
Западная часть	10	24	33	33
Все море	–	21	42	37

Как показывает анализ сезонного развития припая в море Лаптевых за период 1980–2012 гг., ежегодно его разрастание происходит не постепенно, а «скачкообразно» или «ступенчато», и его площадь и ширина в течение нескольких дней значительно увеличиваются. Особенно это характерно для восточной части моря. Примеры такого развития припая приведены на рис. 4. Таких «ступеней» в течение сезона может быть несколько.

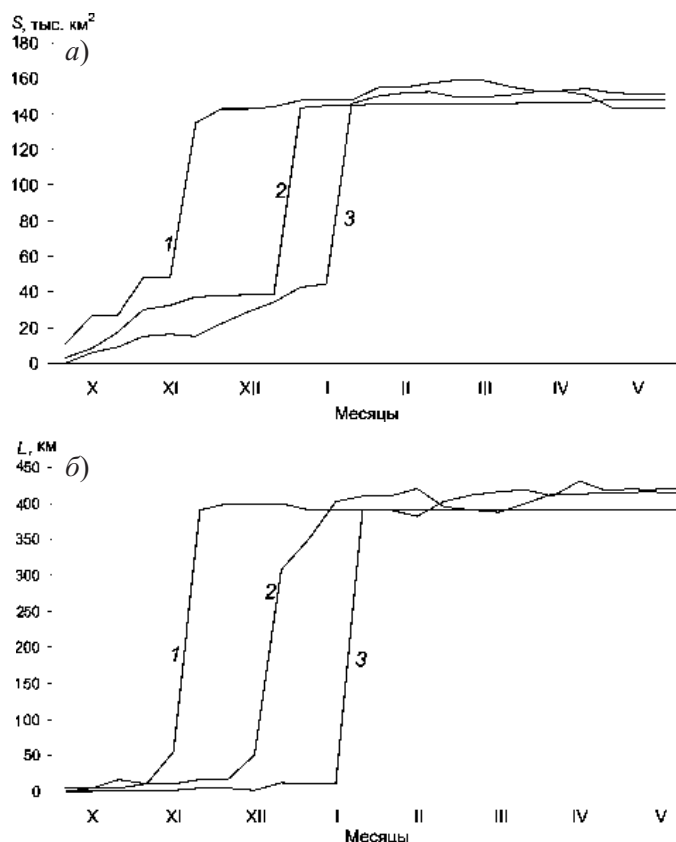


Рис. 4. Изменения площади припая в восточной части моря Лаптевых (а) и его ширины (б) на створе от полуострова Широкостан на северо-запад в различные ледовые сезоны: 1 – 1996/97 г., 2 – 2002/03 г., 3 – 2010/11 г.

Для всех сезонов, приведенных в качестве примеров (рис. 4), в течение декады произошло увеличение площади припая в три и более раз, а его ширины – более чем на 300 км. Такая особенность в развитии припая ранее не отмечалась и нуждается в объяснении.

Известно [Гидрометеорологические условия..., 1986], что с октября по март–апрель большая часть акватории моря Лаптевых находится под влиянием ложбины исландского минимума, тогда как барический режим его восточной части определяет отрог мощного сибирского максимума и западная периферия Арктического антициклона, обуславливающих преобладание воздушных потоков южных направлений. Таким образом, припай в море Лаптевых формируется в условиях преобладания отжимных ветровых потоков, что не должно бы способствовать его развитию. Влияние отжимных ветров на сдерживание развития припая и сокращение его площади отмечалось в ряде работ [Скоков, 1985; Бацких и др., 1987; Юлин, 1997], тем не менее в море Лаптевых образуется один из самых крупных по площади припаев в арктических морях.

В зимний период на акваторию моря Лаптевых выходят 2–3 циклона в месяц [Гидрометеорологические условия..., 1986], с которыми связана быстрая перестрой-

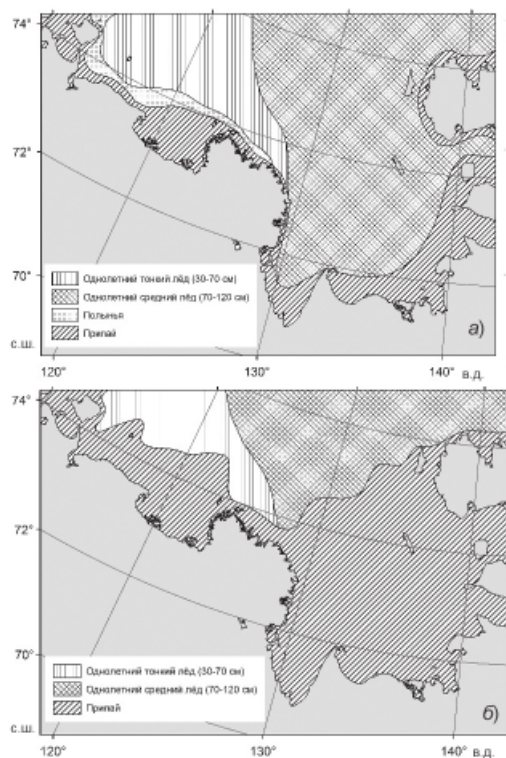


Рис. 5. Ледовые условия в южной и юго-восточной части моря Лаптевых: 22 декабря 2002 г. (а) и 3 января 2003 г. (б).

ка направлений ветра от южных и юго-восточных к северо-западным и северным, которые являются нажимными. Под их влиянием массивы дрейфующих льдов смещаются к границе припая, в результате сильных сжатий происходит их примерзание к ранее образовавшемуся припаю и, как следствие, – «скачкообразное» увеличение площади припая.

При обратной смене ветров на отжимные (южные) направления припай удерживается стамухами, которые образуются на мелководье и банках при дрейфе и подвижках льда и являются своеобразными «якорями», удерживающими припай от разломов. По данным визуальных авиаразведок, стамухи образуются во всей припайной зоне моря Лаптевых [Горбунов, Лосев, 2008].

Для подтверждения приведенного механизма формирования припая в море Лаптевых был выполнен анализ ледовых условий в сезон 2002/03 г., когда в течение третьей декады декабря 2002 г. к началу первой декады января произошло резкое увеличение площади припая и его ширины в восточной части моря (рис. 4).

В конце декабря 2002 г. большую часть акватории южного и юго-восточного района моря Лаптевых занимал массив дрейфующих сплоченных однолетних средних льдов (70–120 см), примыкавший к припаю в Янском заливе и в губе Буор-Хая. В западной части района наблюдалась заприпайная Анабаро-Ленская полынья, мористее которой располагались однолетние тонкие льды (30–70 см). Припай занимал

сравнительно узкую прибрежную зону вдоль всего островного и материкового побережий (рис. 5, слева).

Как показал анализ приземных карт погоды и архива карт однородных циркуляционных периодов (ОЦП), имеющих в отделе долгосрочных метеорологических прогнозов ААНИИ, вследствие перестройки барической ситуации в период с 22 декабря 2002 г. по 3 января 2003 г. наблюдались устойчивые западные, северо-западные и северные ветры, которые обусловили нажимной дрейф льда. В результате этого к 3 января 2003 г. произошло сжатие значительной части дрейфующего льда и примерзание его к кромке предшествующего припая, что привело к значительному, «скачкообразному», увеличению площади припая (рис. 5, справа). Площадь припая с 38,5 тыс. км² увеличилась до 143,3 тыс. км² и в дальнейшем до конца мая почти не изменялась. По данным полярных станций, температура воздуха в этот период составляла около –25 °С, толщина однолетнего среднего льда достигла примерно 1 м.

В заключение отметим, что особенности становления и развития припая в море Лаптевых, установленные благодаря данным регулярного спутникового мониторинга ледяного покрова, следует учитывать как при планировании, так и при производстве различного рода работ и экспедиционных исследований на припаяе в зимнее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бацких Ю.М., Бородачев В.Е., Потанов В.Р.* Оценка влияния метеорологических факторов на безопасность проведения грузовых работ на припаяе // Проблемы Арктики и Антарктики. 1987. № 63. С. 102–107.
- Бородачев В.Е.* Льды Карского моря. СПб.: Гидрометеиздат, 1969. 182 с.
- Гордиенко П.А.* Припайные льды арктических морей. Ч. I. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 176 с.
- Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 278 с.
- Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н.* Стамухи моря Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 2 (79). С. 111–116.
- Гудкович З.М.* Воздействие тангенциальных сил ветра и течений на припай // Труды ААНИИ. 1974. Т. 316. С. 96–106.
- Зубов Н.Н.* Льды Арктики. М.: Изд-во Главсевморпути, 1945. 360 с.
- Карелин Д.Б.* Влияние гидрометеорологических условий на состояние льдов в море Лаптевых. М.: Изд-во Главсевморпути, 1945. 259 с.
- Карелин Д.Б.* Ледовые условия Восточно-Сибирского моря и методы их предсказания. М.: Изд-во Главсевморпути, 1949. 182 с.
- Каркин В.П., Карелин И.Д.* Сезонная и многолетняя изменчивость характеристик ледового режима морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики. М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 187–201.
- Руководство по производству ледовой авиаразведки. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 240 с.
- Скоков Р.М.* К прогнозу взлома припая // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра СССР. 1985. Вып. 270. С. 52–57.
- Юлин А.В.* Сопряженность экстремального развития припая и летних ледовых условий в Восточно-Сибирском море // Труды ААНИИ. 1997. Т. 437. С. 115–123.

PECULIARITIES OF THE LANDFAST ICE FORMATION IN THE LAPTEV SEA

Due to the absence of regular observations of landfast ice in the period prior to the use of ice cover satellite monitoring, some important features of the Laptev Sea landfast ice formation regime were not investigated. The article presents the seasonal position of the landfast ice boundaries in the sea since its formation to the maximum development which can occur with various degrees of probability in any winter month from February to May. The landfast ice in the Laptev Sea is formed in the prevalence of seaward winds. Its annual growth is not gradual, but “abrupt” or “stepwise.” Its area and width can increase several times within few days. The article explains the mechanism of this peculiarity of the landfast ice formation.

Keywords: landfast ice, landfast ice boundary, the area and the width of the landfast ice, coastward and seaward winds, “stepwise” increase of the landfast ice, stamukha.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОГНОЗОВ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ ПЛАВАНИЯ

науч. сотр. Е.И.МАКАРОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: john143@aari.ru

Рассматривается методология системного подхода при составлении специализированных прогнозов ледовых условий плавания. Ледяной покров Арктики рассматривается как открытая система с признаками самоорганизации, которые определяются как критические структуры ледовой среды судоходства. Описаны принципы отображения структурированной системы с помощью матрицы информационных элементов и сигнальной триады в системной ячейке. Приведен пример составления рабочей таблицы ледовых годов-аналогов для специализированного прогноза типа условий плавания в 2013 г.

Ключевые слова: ледовые условия плавания, самоорганизация систем ледяного покрова, критические структуры ледовой среды судоходства, отображение структур ледяного покрова, обучение по аналогиям.

Ледяной покров Арктики является существенным препятствием для судоходства. Известно, что путь вдоль «северного фасада» России является наикратчайшим морским путем из Европы в Азию. Однако на практике время, затраченное на этот путь, далеко не всегда меньше времени на путь южными маршрутами, оно зависит от ледовых условий конкретного года, месяца, декады, от которых, в свою очередь, зависят условия плавания.

В лаборатории изучения ледового плавания (ЛИЛП), созданной П.А.Гордиенко, было выделено направление специализированных ледовых прогнозов. Основная идея специализации ледовой прогностической информации базировалась на том, что судно, движущееся во льдах, является «естественным фильтром главных влияющих характеристик» среды судоходства. Особое значение такой подход приобретает при движении в предельных для данного класса судов ледовых условиях. Огромное число специальных судовых ледовых наблюдений позволило создать классификации комплексов ледовых условий плавания. В предельных для ледопроеходимости случаях такие комплексы могут быть представлены как критические структуры ледовой среды судоходства. Одним из примеров таких критических структур являются нарушения сплошности ледяного покрова (НСЛ). Протяженные НСЛ, ориентированные в направлении целевого пункта плавания, определяют успех при движении среди сморозей старого льда. Составление прогнозов НСЛ большой заблаговременности встречает определенные трудности. Обеспечение специализированной ледовой информацией этапа планирования морских операций в таких условиях предполагает составление сценариев эволюции критических структур среды судоходства на заданный период операций. Решение таких задач возможно с использованием подхода обучения по

аналогиям. Формально обучение по аналогиям – это получение классов объектов путем модификации описания, уже полученного для аналогичного класса объектов. Постановка задачи такова: дан «источник» аналогии – известные знания о некоторых объектах и их взаимосвязях; предметная область (с начальным описанием), знания о которой нужно получить. Например, такой предметной областью может быть тип нарушений сплошности ледяного покрова в Арктическом бассейне за конкретный период в выбранном году-аналоге. Необходимо найти отображение из «источника» в целевую область искомых знаний и описать результаты отображения. Другими словами, такие задачи решаются только подбором годов-аналогов ледовых условий плавания.

Выбор аналогов возможен при наличии системы специализированной классификации или типизации среды судоходства. Существующая система типизации ледовой среды судоходства успешно реализована в математической модели и алгоритмах программной реализации [Бузуев, 1982]. Однако для критических структур среды судоходства пока используются экспертные оценки. Применение теорий статистического оценивания и других математических методов в настоящее время не дали успешных решений этой специфической проблемы.

Развитие современной международной системы мониторинга ледяного покрова дистанционными методами зондирования с помощью искусственных спутников Земли, оснащенных многозональными микроволновыми датчиками, предоставляет возможность для изучения структурных комплексов ледяного покрова. В качестве методологической основы для решения проблем классификации критических структур среды судоходства был выбран синергетический подход. В научной среде стало обычным рассматривать ледяной покров как сложную открытую систему с признаками самоорганизации [Смирнов, 2011]. Обращаясь к понятию «система», необходимо договориться о терминологии, математическом аппарате, способах отображения предмета исследований. Понятийный аппарат может быть использован из теории свободных групп, геометрическим аналогом которой является теория графов [Бурбаки, 1972]. Достаточно распространено матричное описание систем и структур [Басин, 1986].

Однако наиболее привычным и в итоге более удобным оказывается табличное представление элементов системы. Проблемой табличного представления элементов системы является ее размерность. Размерность n природных систем не может быть менее четырех, потому что в природных системах любые ее элементы имеют три пространственные координаты x, y, z и одну временную t -координату. Четырехмерное фазовое пространство системы невозможно отобразить в двухмерном пространстве таблицы. Правило свертки (понижения размерности) допускает снижение размерности системы на единицу. Таким образом, минимальной размерностью структурного элемента системы (системной ячейки) является триада ($n = 3$).

Самым впечатляющим примером применения триадного подхода является периодическая таблица химических элементов Д.И.Менделеева. В этой таблице атрибутом макроструктурных свойств является триада: ряд (порядковый номер) – группа – период. Триада микроструктурных свойств элементов периодической системы определяется формулой [Иванов, 1986]:

$$\Delta N = 2n^2, \quad (1)$$

где Δ – индекс порядкового номера элемента N в периодической таблице; n – главное квантовое число, определяемое рядом натуральных чисел $1, 2, 3, \dots$.

Для решения проблемы описания четырехмерного пространства событий в таблице элементов трехмерных отображений можно использовать известную формулу комбинаторики о числе размещений упорядоченного набора k элементов с повторениями из n элементов:

$$\bar{A}_n^k = n^k. \quad (2)$$

Методические основы триадного подхода для анализа и классификации систем природных объектов были сформулированы А.И.Ставицким [Ставицкий, 1995; Ставицкий, Никитин, 1997]. Им была разработана форма табличного представления любых четырехмерных процессов и пространств событий. Такая таблица была названа матрицей информационных элементов. Здесь под информационным элементом понимается отображение, зафиксированное любым способом (числа, символы, графика) в определенной ячейке таблицы. А.И.Ставицкий же выдвинул гипотезу о том, что любой природный объект можно условно представить в виде «сгустка энергии» – макрозаряда Q в трехмерном пространстве S и времени t , т.е. в четырехмерном пространстве с координатами x, y, z, t , которое используется в квантовой механике. Используя понятийный аппарат теории информации, он показал, что для отображения любого макрозаряда минимально требуется три вида сигналов Q_t, Q_s, Q_{st} . Сигнал Q_t отображает Q только по координате t , то есть является одномерным скалярным сигналом. Сигнал Q_s отображает форму или структурные характеристики макрозаряда, условно зафиксированные в пространстве вектором в координатах x, y, z . Сигнал Q_{st} выступает в виде пространственно-временного сигнала, обладающего как векторными, так и скалярными признаками. В математике такое «векторно-скалярное образование» рассматривается как тензорное поле. Сигнал Q_{st} может рассматриваться как на микро- так и на макроскопическом уровне в координатах четырехмерного пространства x, y, z, t . Геометрической интерпретацией макрозаряда Q является поверхность сферы, описываемая известной формулой:

$$S = 4\pi R^2. \quad (3)$$

Такой подход позволяет построить матрицу (таблицу), состоящую из информационных элементов (ИЭ) с участием всех трех разновидностей сигналов: Q_t, Q_s, Q_{st} . Допуская в формуле (2) $k = 3, n = 4$, можно получить необходимые и достаточные условия для построения простейшего варианта таблицы ИЭ (табл. 1).

Таблица 1

Численная таблица информационных элементов в триадном представлении

Группы																Периоды
0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	
0 0	0 1	0 2	0 3	0 0	0 1	0 2	0 3	0 0	0 1	0 2	0 3	0 0	0 1	0 2	0 3	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	
1 0	1 1	1 2	1 3	1 0	1 1	1 2	1 3	1 0	1 1	1 2	1 3	1 0	1 1	1 2	1 3	
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	
2 0	2 1	2 2	2 3	2 0	2 1	2 2	2 3	2 0	2 1	2 2	2 3	2 0	2 1	2 2	2 3	
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	
3 0	3 1	3 2	3 3	3 0	3 1	3 2	3 3	3 0	3 1	3 2	3 3	3 0	3 1	3 2	3 3	
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	
Ряды аналогов																Периоды
0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	
0 0	0 1	0 2	0 3	0 0	0 1	0 2	0 3	0 0	0 1	0 2	0 3	0 0	0 1	0 2	0 3	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	
1 0	1 1	1 2	1 3	1 0	1 1	1 2	1 3	1 0	1 1	1 2	1 3	1 0	1 1	1 2	1 3	
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	
2 0	2 1	2 2	2 3	2 0	2 1	2 2	2 3	2 0	2 1	2 2	2 3	2 0	2 1	2 2	2 3	
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	
3 0	3 1	3 2	3 3	3 0	3 1	3 2	3 3	3 0	3 1	3 2	3 3	3 0	3 1	3 2	3 3	
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	

В матрице ИЭ каждый элемент представлен в виде дроби. Числитель отображает триаду, составленную из различных значений числа k , включая и нулевое значение «0», расположенных в определенном порядке. Знаменатель является порядковым номером ИЭ. Число «0» предусмотрено для того, чтобы условно зафиксировать начало координат. Начало координат может выбираться произвольно, но во всех случаях обязательно, так как позволяет определить начало отсчета, необходимое в процессе решения практических задач.

При выбранном значении чисел k и n общее число ИЭ $N_u = 64$. В этой же таблице указаны основные признаки матрицы ИЭ в виде «групп», «периодов» и «рядов». Увеличение численных значений k и n приводит к увеличению числа элементов без нарушений условия подобия исходных уравнений (1, 2, 3). Таким образом, А.И.Ставицким реализована идея единого подхода к анализу и классификации любых природных объектов.

Первый положительный опыт применения сигнально-информационной триады А.И.Ставицкого был получен в 1997 г. в работе [Макаров, Фролов, 1997], в которой была выполнена первая классификация критических структур среды судоходства для ледоколов типа «Арктика» в Арктическом бассейне. В этой классификации впервые удалось выделить признаки самоорганизации системы НСЛ. Однако в тот период не использовалась системная модель выбора годов-аналогов в виде матрицы информационных элементов.

Для задач обучения по аналогиям табл. 1 преобразовывается следующим образом. Вместо порядкового номера ячейки таблицы должен быть подставлен хронологический номер года-аналога. Расстановка производится в хронологическом порядке. Позиционирование в первой ячейке таблицы конкретного года-аналога является прерогативой исследователя. Дальнейшая расстановка производится алгоритмически согласно последовательному возрастанию номера ячейки. Заметим некий субъективизм в определении первой ячейки, который является мерой неопределенности состояния любой системы и не может быть устранен. Это, однако, не вносит существенных искажений в результат классификации. Ниже приведена матрица информационных элементов для специализированного прогноза на 2013 г. (табл. 2). В этой таблице информационными элементами выступают конкретные годы-аналоги. Каждый год-аналог был отнесен к определенному типу условий плавания в летне-осенний период навигации. Для типизации был применен комплексный критерий трудности плавания по всей трассе Северного морского пути.

Таблица 2

Рабочая таблица групп годов-аналогов критических структур среды судоходства на 2013 г.

Группы															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971
6	5	4	7	5	7	1	1	6	3	6	6	4	4	6	8
1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
8	6	8	3	8	4	8	1	8	1	6	6	7	7	8	5
1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
8	4	7	5	5	5	8	2	8	7	8	7	7	5	2	8
2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013*						
5	2	7	5	7	7	6-3	2	3	3-6						

Ряды аналогов

Примечание: * – его структурным аналогом являются 1997, 2009, 2005 гг.

Таблица 3

Распределение годов-аналогов по типам летних навигаций, объединенных в классы (тяжелые, средние, легкие) по комплексным критериям ледовых условий плавания

Типы							
1	4	6	8	7	5	3	2
Классы ледовых условий							
Тяжелые			Средние		Легкие		
				2009			
				2008			
				2006			
				2000			
			2003	1999			
			1998	1997			
			1996	1990			
		2010	1994	1985	2007		
		1983	1988	1984	2004		
		1982	1986	1971	2001		
		1973	1980	1961	1993		
	1989	1970	1978	1959	1992	2013*	
1981	1977	1967	1976	1955	1991	2012	2011
1979	1969	1966	1974	1953	1987	1975	2005
1963	1968	1964	1972	1952	1960	1965	2002
1962	1958	1956	1954	1951	1957	1954	1995

Примечание: * – его структурным аналогом являются 1997, 2009, 2005 гг.

Использование рабочей таблицы, годов-аналогов позволило определить тип распределения критических структур в навигации 2013 г. (табл. 3).

Эффективность предлагаемого системного подхода заключается в формализации процедуры подбора годов-аналогов на предстоящий период навигации. Анализируя представленные таблицы, можно сделать вывод о том, что аномально легкие условия ледового плавания в Арктике начинают переходить к средним ледовым условиям плавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Басин М.А. Синергетика – волновой подход к исследованию открытых структур и систем // Проблемы ноосферы и устойчивого развития: Материалы первой международной конференции. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. С. 104–107.

Бурбаки Н. Элементы математики. Группы и алгебры Ли. М.: Мир, 1976. 496 с.

Иванов Б.Н. Законы физики. М.: Высшая школа, 1986. 101 с.

Макаров Е.И., Фролов С.В. Проблема специализированного гидрометеорологического обеспечения высокоширотного судоходства во льдах Арктики и реалии ее решения // Проблемы Арктики и Антарктики. 1997. № 71. С. 129–147.

Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под ред. В.Г.Смирнова. СПб.: ААНИИ, 2011. 240 с.

Ставицкий А.И. На пути к искусственному интеллекту: Новые принципы передачи и обработки информации с позиции единого информационного поля. СПб.: ИНТАН, 1995. 134 с.

Ставицкий А.И., Никитин А.Н. На одном языке с природой. СПб.: ИНТАН, 1997. 137 с.

APPLICATION OF SYSTEMIC METHODS TO PRODUCE SPECIALIZED ICE FORECASTS

The author consider the methodology of the system approach when making specialized ice forecasts. Ice cover of the Arctic is regarded as an open system with signs of self-organization. Signs of self-organization are identified as critical structures ice protection of shipping. Describes how to display a structured system using a matrix of information elements and the signal of the triad in the system cell. An example of the drafting table's ice-analogues forecast for specialized type of sailing conditions in 2013.

Keywords: ice conditions of navigation, self-organization of systems of the ice cover, critical structures ice environment of navigation, mapping structures of the ice cover, training on analogies.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКОВ ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

канд. геогр. наук В.Ю.ТРЕТЬЯКОВ, зав. лаб. С.В.ФРОЛОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: v_yu_tretyakov@mail.ru, svf@aari.ru

Рассматривается методология моделирования риска аварийных ситуаций, вызываемых сжатиями судов дрейфующим льдом. В модели способом Монте-Карло имитируется статическое воздействие льда на корпус судна. При этом учитывается воздействие как ровного льда, так и консолидированного слоя гряд торосов. Приводятся результаты апробации модели для маршрута Морская ледостойкая платформа «Приразломная» – п. Мурманск.

Ключевые слова: ледовые условия плавания, сжатие льда, моделирование рисков.

Цель данной работы заключалась в разработке методики оценки ущерба из-за аварийных ситуаций с танкерами из-за сжатий дрейфующих льдов, приводящих к разливам углеводородов. Для апробации методики были выполнены оценки вероятности возникновения аварийных ситуаций на рекомендованных маршрутах плавания танкеров по Баренцеву морю.

Стратегическое планирование морских транспортных систем на длительные периоды их функционирования требует выполнения оценки рисков. Наиболее распространен подход к определению риска неблагоприятного события, учитывающий не только вероятность события, но и «вес» его негативных последствий. Поэтому риск R может быть определен как произведение вероятности опасности рассматриваемого события или процесса P на величину ожидаемого ущерба Z : $R = P \cdot Z$. Здесь понятие «риск» объединяет два понятия – «вероятность опасности» и «величина ущерба». Для измерения величины ущерба универсальным представляется использование стоимостного выражения последствий неблагоприятного события (финансовый риск), что позволяет объективно выбирать оптимальную стратегию.

Оценивание рисков при танкерной транспортировке углеводородов является развивающимся направлением современной науки [Фрумин, Белов, 2006; Берковиц, Биненко, Донченко, 2006; Фрумин, Мохсен, 2009]. Однако оценка рисков производится на основе мировой статистики, без учета специфики взаимодействия судов с ледяным покровом. При ледокольной проводке танкеров возможны две специфические причины возникновения аварийной ситуации. Во-первых, это столкновение танкера с льдиной, торосистым образованием в проложенном ледоколом канале или столкновение с кромкой канала. Здесь возможно определение максимальной безопасной скорости движения судна в зависимости от его прочностных свойств и характеристик ледяного покрова. Строгое соблюдение правил судоходства позволяет исключить подобные аварийные ситуации, относящиеся к классу аварийных ситуаций «человеческого фактора». Вторая возможная причина аварии – сжатие танкера

сходящимися кромками канала. Это форс-мажорное обстоятельство, которого невозможно избежать. Авария является результатом статического взаимодействия корпуса судна и морского льда при прочности элемента ледяного покрова, превышающей прочность корпуса судна.

Для оценки риска необходимо знать значения двух параметров: вероятности аварийной ситуации и ущерба, возникающего при ее наступлении. Приводящие к аварийным ситуациям обстоятельства слишком разнообразны, чтобы использовать статистические данные по ограниченному числу произошедших с судами различных типов событий. Выход – в методе статистического моделирования Монте-Карло. Его суть в следующем: пусть какое-либо событие (в нашем случае – аварийная ситуация с судном) наступает при определенном совпадении значений ряда параметров, рассматриваемых как случайные величины. Законы статистического распределения значений параметров известны. В компьютерных алгоритмических языках программирования существуют функции генерации случайных чисел. Это либо целые числа от 0 до 100, либо дробные от 0 до 1. Если рассматривать случайные числа в диапазоне от 0 до 1 в качестве квантилей интегральных функций распределения параметров модели, то по значениям квантилей можно определять сами значения параметров. При каждом модельном испытании в соответствии с полученными значениями параметров определяется, наступило ожидаемое событие (в нашем случае – аварийная ситуация) или нет. Серия модельных расчетов (модельный эксперимент) выполняется до тех пор, пока отношение числа наступления события к общему числу испытаний не становится устойчивым. При проведении ряда модельных экспериментов полученная вероятность наступления события является случайной величиной. Метод Монте-Карло не может дать ответ, когда произойдет авария, но может определить вероятность аварии и число аварий за достаточно длительный период времени. Для этого необходимо знать статистические распределения модельных параметров. Эти распределения можно получить на основании натурных данных либо определить теоретически.

В лаборатории изучения ледового плавания ААНИИ разработаны и совершенствуются компьютерная статистическая модель определения вероятности наступления аварийной ситуации из-за сжатия судна дрейфующими льдами и программа расчета экологического ущерба из-за аварийного разлива нефти. В модели оценки вероятности аварийных ситуаций определяющим параметром является максимальное давление, которое способно испытывать судно в районе миделя. В модели судно может находиться или просто в зоне сжатия без учета его силы, или вне зон сжатия. Если судно попадает в зону сжатий, то выполняется определение максимально возможного давления льда на корпус судна, которое для случая статичного взаимодействия не может превышать предела прочности льда. Если максимальное давление льда превышает предел прочности корпуса судна, то в модели происходит аварийная ситуация. Цель схемы моделирования заключается в оценке количества аварийных ситуаций за длительный период времени. Полученное отношение числа аварийных ситуаций к общему числу транспортных операций численного эксперимента является оценкой вероятности возникновения аварийной ситуации во время одного плавания.

Движение каравана или отдельного судна моделируется только в сплоченных дрейфующих льдах, т.к. только в них возможна аварийная ситуация из-за сжатия льда. Атрибуты ледовых зон рассматриваются как случайные величины. Для моделирования отдельных плаваний используется генератор случайных чисел компьютера и

законы распределения параметров ледяного покрова, которые задаются во внешних текстовых файлах. Перед началом численного эксперимента пользователь с помощью интерфейса модели выбирает файлы распределений параметров. Модель реализована в среде создания приложений Borland Delphi 7.0. Имитируется разрушение борта судна в районе миделя из-за воздействия как ровного льда, рассматриваемого как пластина постоянной толщины, так и перпендикулярной борту судна гряды торосов, рассматриваемой в качестве балки на упругом основании – водной толще. Расчет нагрузки на борт ровного льда выполняется по толщине льда максимального возраста. Предел прочности ровного льда на сжатие определяется как минимальная величина из прочностей льда на раздробление и на излом. Прочность корпуса судна рассчитывается в зависимости от ледового класса и водоизмещения судна в соответствии с Правилами Российского Морского регистра судоходства. Вызывающая раздробление льда локальная погонная нагрузка на борт судна q_c рассчитывается как произведение прочности льда при одноосном сжатии на толщину ровного льда [Попов и др., 1967]. Величина локальной погонной нагрузки q_b , вызывающей излом ледяной пластины, рассчитывается по выражениям [Попов и др., 1967; Фаддеев, Хейсин, 1985]:

$$q_b = \sqrt{\rho g D}, \quad (1)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}. \quad (2)$$

В выражении (1) ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, D – цилиндрическая жесткость ледяной пластины; в выражении (2) E – модуль Юнга льда, h – толщина ледяной пластины, μ – коэффициент Пуассона, т.е. отношение модуля поперечной деформации к модулю растяжения (Юнга). В модели его значение равно 0,33. Выбирается меньшая нагрузка из нагрузок раздробления льда и его изгиба. Для перехода от локальной погонной нагрузки с размерностью н/м к давлению с размерностью н/м² (паскали) погонная нагрузка делится на протяженность зоны контакта «лед – корпус судна» по вертикали. Принято, что протяженность зоны контакта по вертикали совпадает с толщиной льда.

При торосистости не более 2 баллов сохраняется возможность обхода торосистых образований, торосистость свыше 2 баллов вынуждает ледокол следовать не только по ровным участкам, но и преодолевать торосистые образования [Бузуев, 1982]. Средний угол между перпендикуляром к генеральному направлению гряды торосов и курсом судна составляет 15° [Бузуев, 1982]. Поэтому упирающийся в борт судна консолидированный слой гряды торосов рассматривается как балка, прикрепленная к пластине ровного льда и лежащая на сплошном упругом основании – морской воде.

Перед началом численного эксперимента задаются законы распределения параметров модели. Пользователь имеет возможность просмотра графиков распределений. Вероятность сжатия в сплоченных льдах задается выбором текстового файла с этой величиной. Ряд параметров вводится с клавиатуры: это отношение ширины основания гряды торосов к ее высоте, значение модуля Юнга для льда, пределы прочности молодого, тонкого, среднего и толстого льда. Также необходимо выбрать из списка класс ледовых усилений судна и ввести с клавиатуры водоизмещение судна. Пользователь должен выбрать вариант работы модели: с автоматическим или принудительным прекращением имитации плаваний в одном численном эксперименте. В первом случае эксперимент продолжается до тех пор, пока отношение суммарного

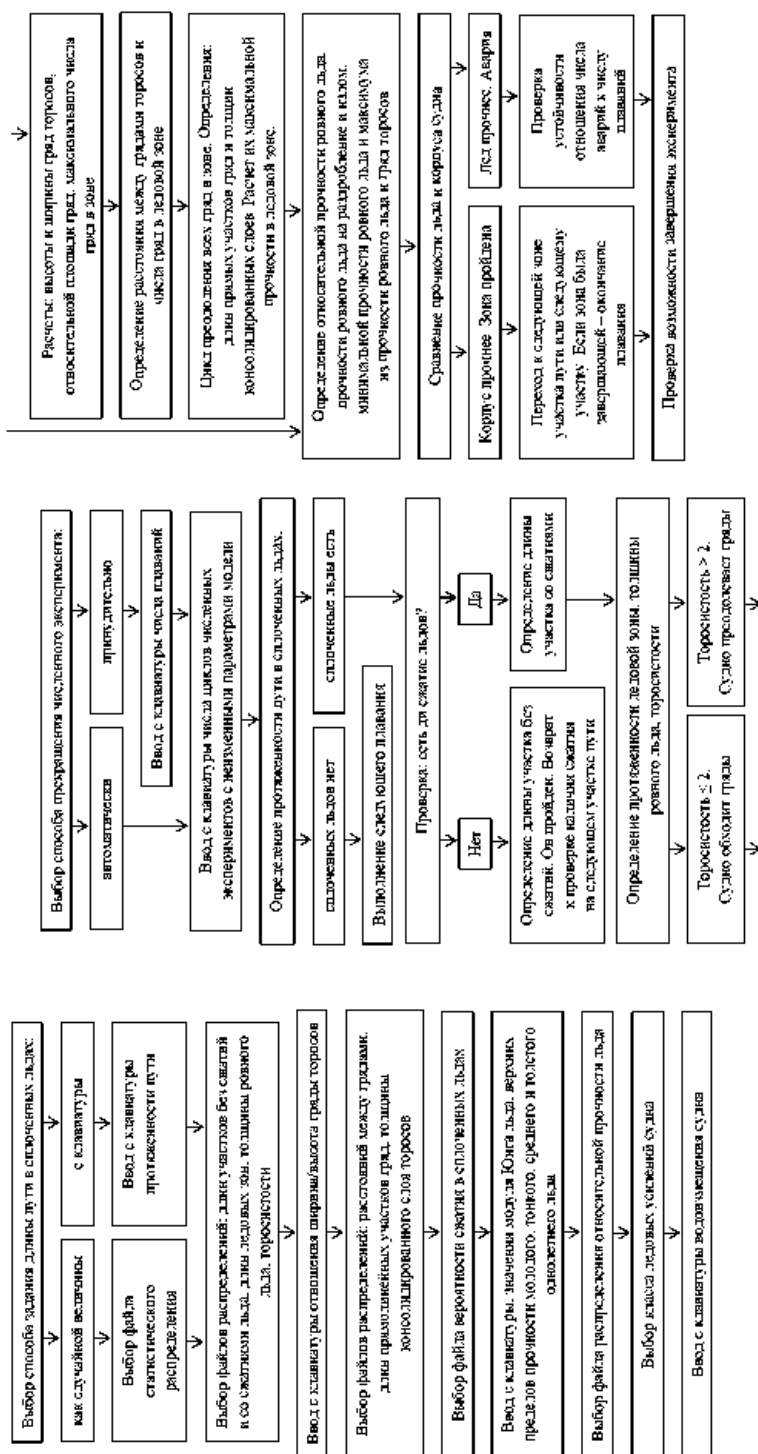


Рис. 1. Схема задания параметров эксперимента (слева) и его выполнения (в центре и справа).

количества аварийных ситуаций к общему числу плаваний не стабилизируется. Во втором – пользователь задает количество плаваний в каждом эксперименте. При этом параметры модели остаются неизменными. На рис.1 представлена схема задания параметров численного эксперимента и его выполнения.

По завершении численного эксперимента пользователь может выбрать: повторить численный эксперимент с неизменными значениями параметров и статистическими распределениями случайных величин или завершить компьютерное моделирование и записать его результаты во внешний текстовый файл.

Предлагается следующий алгоритм моделирования вероятности аварийных ситуаций из-за сжатий льдов. Год разбивается на отдельные декадные (полумесечные или месячные) интервалы. Для каждого интервала, приходящегося на период существования ледяного покрова, определяется отношение числа аварий к числу плаваний. Для этого выполняется не менее 30 численных экспериментов с принудительным завершением каждого при выполнении определенного количества плаваний. Это количество определяется как возможное число плаваний, приходящихся на данный внутригодовой интервал за весь период существования данной морской транспортной системы. В этом случае вероятность аварии выступает в качестве случайной величины со своим математическим ожиданием (МО) и средним квадратичным отклонением (СКО). Для каждого интервала определяется сумма МО и утроенного СКО. Затем определяется среднегодовая сумма МО и утроенного СКО вероятности аварии. Если все интервалы имеют одинаковую длительность и при этом количество приходящихся на них рейсов также одинаково, т.е. морские перевозки осуществляются круглогодично и равномерно, то среднегодовая вероятность аварии определяется как среднее арифметическое подобных сумм для отдельных внутригодовых интервалов. В противном случае в зависимости от доли от общего числа рейсов, приходящихся на каждый интервал, рассчитывается вес интервалов и при определении среднегодовой суммы МО и утроенного СКО вероятности аварии учитывается неравновесность интенсивности навигации внутри календарного года. Разумеется, для интервалов с отсутствием ледяного покрова вероятности аварийных ситуаций из-за сжатий льдов равны нулю. Максимальное количество аварий определяется как произведение среднегодовой суммы МО и утроенного СКО вероятности аварии на общее количество рейсов за весь период эксплуатации транспортной системы. Разумеется, нет гарантии, что не случится большее количество аварий. Однако для нормально распределенной величины вероятность этого события согласно «правилу трех сигм» составляет всего 0,15 %, поэтому для расчетов ожидаемого убытка предлагается использовать именно этот алгоритм.

С помощью генератора случайных чисел и заданного распределения объемов разливов нефти при авариях определяем количество вылившейся нефти. Ущерб грузовладельца равен произведению этого количества на рыночную цену нефти. Объем потерянной нефти может рассматриваться как случайная величина, рассчитываемая на основании заданного закона распределения объемов вылившейся нефти при имевших место авариях. Стоимость углеводородного сырья также может рассматриваться как случайная величина. Эмпирическое распределение этой величины может быть определено на основании статистических данных по средним мировым ценам на углеводородное сырье за последние десять-пятнадцать лет. В качестве первого приближения можно продолжить тренд цены за последние десятилетия и рассчитывать ущерб исходя из прогнозируемой цены в середине периода эксплуатации морской транспортной системы.

Ущерб судовладельца складывается из затрат на ремонт судна или остаточной стоимости судна при его потере и упущенной выгоды. Упущенная выгода судовладельца определяется перемножением суточной расценки фрахта за вычетом эксплуатационных расходов и издержек, а также суточного амортизационного снижения стоимости судна, т.е. суточной чистой прибыли судовладельца, и продолжительности периода вывода судна из эксплуатации.

Существуют два методологических подхода к определению экономического ущерба в результате загрязнения окружающей среды [Светлов, Гулькова, 2006]: косвенный (укрупненный) и реципиентный (на основании суммирования убытков конкретных потерпевших). Косвенный подход к оценке экономического ущерба предполагает использование ряда показателей, отражающих значения факторов, определяющих величину ущерба; произведение этих показателей определяет величину экономического ущерба. Примером реализации косвенного подхода при оценке экономического ущерба от загрязнения окружающей среды служит «Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства», принятая Министерством природных ресурсов РФ. Данная методика определения экологического ущерба реализована нами в виде компьютерного приложения, разработанного в интегрированной среде Delphi 7.0.

Для апробации модели был выполнен ряд численных экспериментов с имитацией плаваний танкеров типа «Василий Динков» по маршруту Морская ледостойкая платформа «Приразломная» – Мурманск. Статистические распределения параметров модели были определены по данным экспедиций ААНИИ и результатам обработки космических снимков за 1978–1979, 2002–2003, 2005–2006, 2009–2010 гг. Для случая экстремально тяжелых условий отношение числа аварий к числу плаваний (вероятность возникновения аварийной ситуации) составляет: в декабре – 0,003; в январе – 0,005; в феврале – 0,003; в марте – 0,024; в апреле – 0,037. Вероятность аварийных ситуаций из-за сжатия льда в другое время года равна нулю. Планируется выполнить серию экспериментов с моделью для определения вероятностей аварийных ситуаций и объемов ущерба при долгосрочном функционировании морских систем транспортировки углеводородного сырья по стандартным маршрутам плаваний в Баренцевом и Карском морях. Это позволит учитывать величину ожидаемого ущерба при стратегическом планировании морских транспортных операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берковиц А.В., Биненко В.И., Донченко В.К.* Экологические риски, связанные с транспортировкой углеводородов, и безопасность Балтийского моря // Сборник тезисов VII Международного экологического форума «День Балтийского моря». СПб.: ООО «Изд-во “Диалог”», 2006. С. 532–538.
- Бузуев А.Я.* Влияние природных условий на судоходство в замерзающих морях. Л.: Гидрометеониздат, 1982. 74 с.
- Попов Ю.Н., Фаддеев О.В., Хейсин Д.Е., Яковлев А.А.* Прочность судов, плавающих во льдах. Л.: Судостроение, 1967. 224 с.
- Светлов И.Б., Гулькова С.Г.* Механизм управления природно-техническими системами ТЭК. Владивосток: Дальнаука, 2006. 123 с.
- Фаддеев О.В., Хейсин Д.Е.* Определение структуры формул для оценки взаимодействия ледяного покрова с конструкциями // Труды ААНИИ. 1985. Т. 391. С. 55–62.

Фрумин Г.Т., Белов Д.М. Оценка рисков аварий танкеров // Материалы Всероссийской конференции «Риск-2006». М.: Изд-во РУДН, 2006. С. 279–281.

Фрумин Г.Т., Мохсен А.М.А. Анализ риска при аварийных разливах нефти и нефтепродуктов // Сборник тезисов X Международного экологического форума «День Балтийского моря». СПб.: ООО «Макси-Принт», 2009. С. 67–69.

V.YU.TRETYAKOV, S.V.FROLOV

MODEL OF AN ESTIMATION OF NAVIGATION RISKS IN DRIFTING ICE

Methodology of simulation of risk of accidental situations which are caused by nip of vessels due to ice compacting is considered. The model simulates static impact of drift ice upon a ship hull by means of the Monte-Carlo method. There is taking into account both level ice impact and one of the consolidated layer of the ridge. The results of the model testing for the navigation operations along the standard route between the oil field “Prirazlomnoye” and the port of Murmansk are presented.

Keywords: navigation risk simulation, ice compression, ice conditions.

НОВЫЕ АЛГОРИТМЫ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

ст. науч. сотр В.Е.ФЕДЯКОВ, зав. лаб. С.В.ФРОЛОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: fedyakov@aari.nw.ru, svf@aari.ru

В статье дано описание новых алгоритмов статистического моделирования вероятностных изменений показателей трудности плавания судов во льдах. Первый алгоритм используется при оперативной разработке навигационных рекомендаций и основан на расчете наиболее вероятных изменений затрат времени и средних скоростей движения при заданных характеристиках ледовых условий плавания. Второй алгоритм предназначен для расчета распределения характеристик трудности плавания при изучении климатической изменчивости состояния ледяного покрова на действующих либо перспективных трассах плавания в условиях ограниченного объема фактической информации.

Ключевые слова: ледовые условия плавания, эксплуатационные характеристики, климатическая изменчивость, статистическое моделирование, метод Монте-Карло.

В начале 1980-х гг. в ААНИИ был разработан эмпирико-статистический метод количественной оценки трудности плавания во льдах, на основе которого была создана эмпирическая модель движения судна во льдах [Бузуев, 1982].

Ледовые условия в районе движения в модели трансформируются в условия плавания с учетом выявленных общих закономерностей, связанных с избирательным характером движения судна во льдах. Модель ориентирована на оценку средних показателей трудности плавания. С одной стороны, такой подход методологически оправдан и позволяет решать достаточно широкий круг задач как в оперативном плане при обеспечении судоходства, так и при изучении условий плавания на действующих и перспективных трассах. С другой – находится в некотором противоречии с весьма мозаичной картиной изменчивости характеристик ледяного покрова. Поэтому представляется перспективным использование полученных закономерностей для расчета возможных изменений показателей трудности плавания с помощью статистического моделирования.

Введение нового блока «Статистика» расширяет возможности модели, так как позволяет перейти на более качественную, вероятностную оценку риска движения судов во льдах, а также получать вероятностную картину распределения показателей трудности плавания в зависимости от возможных статистически значимых изменений отдельных характеристик ледяного покрова. Усовершенствованная таким образом модель позволяет производить расчет наиболее вероятных диапазонов изменений затрат времени и средних скоростей движения, когда ледовые условия плавания заданы (алгоритм 1), а также – расчет распределения характеристик трудности плавания при изучении климатической изменчивости состояния ледяного покрова в условиях ограниченного объема фактической информации (алгоритм 2).

Алгоритм 1. Расчет наиболее вероятных диапазонов изменений затрат времени и средних скоростей движения при заданных ледовых условиях плавания

Для реализации алгоритма разработаны:

- программа, позволяющая формировать блок «Статистик», описывающий закономерности изменений ледовых условий плавания;
- программа статистического моделирования, которая преобразовывает файл исходных данных по установленным закономерностям;
- создан дополнительный модуль, позволяющий накапливать полученные результаты, сохранять и преобразовывать их в виде, удобном для дальнейшего анализа.

Схема взаимодействия программных блоков модели представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема расчета показателей трудности плавания судов во льдах.

Программа формирующая блок «Статистик» оформлена в виде электронного блокнота с возможностью «постраничного» просмотра и внесения необходимой корректуры, который состоит из четырех отдельных страниц со статистическими характеристиками параметров ледяного покрова.

Страница 1 – протяженность однородных ледовых зон, которая задается путем выбора закона распределения – усеченного нормального или дискретного.

Страница 2 – общая и частные сплоченности льда представляются в виде таблицы, где для основных градаций сплоченности прописаны их вероятностные изменения. При наличии двух и более возрастов вероятная сплоченность определяется для каждого возраста льда отдельно.

Страница 3 – нарушения сплошности ледяного (НСЛ). Модель позволяет учитывать эту немаловажную для судоходства характеристику ледяного покрова на вероятностном уровне, не прибегая к искусственным приемам их описания. Возможные изменения горизонтальных размеров ледовых образований (форм льда) заданы в виде трех таблиц – дифференцированно по типу распределения НСЛ (типы «А», «В» и «D») [Frolov, Klyachkin, 1999].

Страница 4 – толщина льда (в зависимости от возраста), торосистость и сжатия. В модели апробируются два варианта расчета толщины льда.

В первом варианте считается, что средняя толщина льда имеет равномерное распределение на интервале, равном:

$$\pm P_i \cdot H_{\lambda}, \quad (1)$$

где P_i – коэффициент (вероятное отклонение, заданное в пределах от 0 до 1), H_{λ} – заданная средняя толщина льда. Например, если $H_{\lambda} = 150$ см, $P_i = 0,1$, то, соответственно, при моделировании условий плавания будут использоваться толщины в интервале от 135 до 165 см.

Во втором варианте средние толщины льда имеют усеченное нормальное распределение на интервале, равном:

$$\pm K_i \cdot \sigma, \quad (2)$$

где K_i – коэффициент, σ – среднее квадратическое отклонение. Целесообразно оба коэффициента (P , K_i) задавать отдельно для каждой из основных возрастных градаций ледяного покрова.

Возможные изменения *торосистости* льда представлены в табличном виде наподобие таблицы изменчивости сплоченности. Максимальная амплитуда этой характеристики задана в интервале $\pm 1,5$ балла.

В модели выбор варианта счета регламентируется заданной *вероятностью сжатия*, которая распространяется только на расчет при условии движения судна в сплоченных льдах.

Для летнего периода дополнительно задается разрушенность ледяного покрова. В этом случае используется максимальная толщина льда на конец периода его нарастания.

Программа «Моделирование ледовых условий плавания» предусматривает чтение исходного файла данных, чтение разработанного для этой трассы файла статистик, задание числа «испытаний» и блок трансформации ледовых условий по заданным статистическим законам распределения (метод Монте-Карло [Соболев, 1968]).

В программе «Расчет показателей трудности плавания» задается тип судна (каравана судов) и время (месяц), к которому относятся данные ледовые условия. Вывод итоговых результатов оформлен в виде электронной таблицы MS Excel, что упрощает их дальнейший анализ.

Для иллюстрации работы всего комплекса описанных выше программ рассмотрим конкретный пример. Для этого задаются ледовые условия, которые реально могут иметь место на трассах СМП в весенний период навигации (табл. 1).

Таблица 1

Пример распределения характеристик ледяного покрова на маршруте движения

L, мили	К	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	Φ ₁	Φ ₂	Φ ₃	Φ ₄	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	Т, баллы
		Баллы								Сантиметры				
20	0													
120	2	6	3–4			2	3			150	80			2
100	3	1	3	6		3	4	4		160	80	60		2–3
50	1	8				2				100				3
40	4	0–1	4–5	2	3	5	4	3	3	350	140	60	30	2–3
40	3	4–5	1–2	3		4	2	3		140	60	30		2
40	3	2–3	1–2	3		2	3	4		130	65	25		3
40	1	8				4				50				0
12	2	6	3–4			3	2			160	80			2
10	3	1	3	6		3	3	4		150	85	70		2–3
5	1	8				2				100				3
4	4	0–1	4–5	2	3	5	4	3	3	350	140	50	30	2–3
4	3	4–5	1–2	3		4	2	3		160	50	30		2–3
4	3	2–3	1–2	3		2	3	3		140	60	30		3
4	1	8				4				50				0
12	2	6–7	3–4			0				150	80			2

Примечание: L – протяженности участков плавания; К – количество возрастных градаций льда (0 – чисто); C_i – частная сплоченность; Φ_i – формы льда (0 – припай, 1 – обширные поля, 2 – поля, 3 – поля и обломки, 4 – обломки и битый лед, 5 – крупно-мелкобитый лед; H_i – толщина льда, Т – торосистость.

Итоговая расчетная таблица распределения характеристик трудности плавания

Ледокол «Арктика» (апрель)																	
Распределение протяженности пути по интервалам скорости движения																	
Скорость	>15	14-15	13-14	12-13	11-12	10-11	9-10	8-9	7-8	6-7	5-6	4-5	3-4	2-3	1-2	0,5-1	<0,5
L_p , мили	69,5	36,7	53,5	81,1	71,5	45,5	59,9	43,7	25,5	14,0	3,9	0,1	0	0	0	0	0
L_i/L , %	13,8	7,3	10,6	16,1	14,2	9,0	11,9	8,6	5,0	2,8	0,8	0	0	0	0	0	0
Min, мили	49,6	0	3,4	21,5	7,1	0	4,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max, мили	104,0	95,2	129,3	164,6	142,5	123,4	133,6	109,3	85,7	50,6	24,3	9,8	9,6	0	0	0	0
n , %	100	99	100	100	100	99,6	100	99,6	95,8	91,0	49,2	2,2	0,8	0	0	0	0
Протяженность трассы $L = 505$ миль, число испытаний = 500																	
Распределение средних скоростей движения																	
$V_{ср}$	10,5	10,7	10,9	11,1	11,3	11,5	11,7										
N	2	38	118	196	123	21	2										
n , %	0,4	7,6	23,6	39,2	24,6	4,2	0,4										
P %, удары	3	2	1	1	1	1	1										
Караван а/л «Арктика» + «СА-15» (апрель)																	
Распределение протяженности пути по интервалам скорости движения																	
Скорость	>15	14-15	13-14	12-13	11-12	10-11	9-10	8-9	7-8	6-7	5-6	4-5	3-4	2-3	1-2	0,5-1	<0,5
L_p , мили	20,0	6,7	42,8	36,3	48,9	67,8	56,4	37,4	94,2	58,2	18,5	9,7	7,3	0,7	0	0	0
L_i/L , %	4,0	1,3	8,5	7,2	9,7	13,4	11,2	7,4	18,6	11,5	3,7	1,9	1,5	0,1	0	0	0
Min, мили	20,0	0	7,0	0	0	10,6	0	0	31,1	0	0	0	0	0	0	0	0
Max, мили	20,0	38,8	81,0	83,7	116,4	134,0	126,2	96,7	167,9	132,8	71,4	50,6	32,9	17,2	9,6	0	0
n , %	100	55,4	100	98,8	99,6	100	99,8	98,2	100	99,8	87,8	71,8	65,8	11,4	0,8	0	0
Протяженность трассы $L = 505$ миль, число испытаний = 500																	
Распределение средних скоростей движения																	
$V_{ср}$	8,1	8,3	8,5	8,7	8,9	9,1	9,3										
N	11	42	132	201	87	25	2										
n , %	2,2	8,4	26,4	40,2	17,4	5,0	0,4										

Ледовые условия, представленные в табл. 1, были записаны в файл исходных данных. Далее, используя «Статистики», были смоделированы файлы для числа повторений 500, по которым выполнялся расчет для каравана в составе а/л «Арктика» и транспортного судно типа СА-15.

Результаты расчетов приведены в табл. 2. В верхней части таблицы располагаются расчетные данные для автономного движения ледокола, ниже – для каравана.

Распределение протяженности пути по интервалам скорости движения:

- скорость – интервалы скоростей движения в однородных ледовых зонах;
- L_i – средняя протяженность однородных ледовых зон;
- L_i/L , % – средняя протяженность однородных зон в процентах от общей протяженности трассы;
- Min, Max – минимальная и максимальная протяженность однородных участков с данным диапазоном скоростей;

- n , % – повторяемость диапазона скоростей в процентах от числа повторений.

Распределение средних скоростей движения:

- $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения по выбранной трассе;
- N – число случаев из общего числа повторений;
- n , % – число случаев, но в процентах от общего числа испытаний;
- P %, удары – среднее вероятное время работы набегам в процентах от суммарных затрат (рассчитывается только для автономного движения судов).

Алгоритм 2. Расчет распределения характеристик трудности плавания при изучении климатической изменчивости состояния ледяного покрова

в условиях ограниченного объема фактической информации

Основной задачей алгоритма является оценка климатической изменчивости трудности плавания судов во льдах с учетом «динамических» факторов, главные из которых – сжатия и нарушения сплошности ледяного покрова.

В модели учитываются сжатия интенсивностью 1 балл по следующим причинам. Во-первых, вероятность сжатий интенсивностью 0–1, 1 и 1–2 балла (среднее 1 балл) составляет более 80 % [Бузуев, Федяков, 1979]; во-вторых, как правило, при таких сжатиях современные транспортные суда ледового плавания и ледоколы продолжают сохранять устойчивое движение.

Основной причиной, вызывающей как сжатие, так и образование НСЛ, является неравномерность дрейфа ледяного покрова. Наибольший вклад в суммарный дрейф льда вносит ветер. Для учета ветровых потоков используются их укрупненные характеристики (типы) в зависимости от положения трассы по отношению к береговой черте. Обычно направление ветра дифференцируется на три типа: нажимной, отжимной и нейтральный [Бузуев и др., 1988].

Как показали исследования, сжатия в ледяном массиве могут проявляться при ветрах различных направлений, но вероятность их возникновения, продолжительность действия и интенсивность существенно различаются [Бузуев, Федяков, 1979; Bradford, 1972]. По данным [Воеводин, 1977], ось сжатия совпадает с направлением ветра с вероятностью 88 %, а наибольшие по протяженности и ширине каналы и разводья в массиве дрейфующих льдов образуются перпендикулярно генеральному направлению дрейфа [Горбунов, Лосев, 1975].

Для реализации алгоритма 2 были разработаны следующие программы.

Программа, формирующая блок «Статистик» выполнена в виде двухстраничного электронного блокнота и позволяет задать необходимые характеристики для последующего моделирования ледовых условий на трасе плавания.

Страница 1 содержит:

- название трассы, декаду и месяц (для идентификации файла статистик);
- распределение ветра по трем градациям – нажимной, отжимной и нейтральный;
- вероятность возникновения условий, предопределяющих сжатия льда для описанных выше направлений ветровых потоков;
- коэффициенты, учитывающие продолжительность действия сжатий;
- граничное значение протяженности трассы, где наиболее вероятно сохранение типа ветровых условий.

Страница 2 содержит типы НСЛ, для которых заданы вероятность изменений форм льда и вероятность их реализации при отсутствии и наличии сжатий для ветров различных направлений.

Программа формирования массива ледовых условий плавания переработана с учетом необходимости ввода архива климатических характеристик условий плавания, что позволяет дополнять его новыми данными, а также редактировать.

Программа «Моделирование ледовых условий плавания» определяет тип ветра, наличие – отсутствие сжатий и тип НСЛ.

В программе «*Расчет показателей трудности плавания*» рассчитываются для каждого года – протяженность трассы; средние, максимальные и минимальные затраты времени и скорости движения, а также средняя протяженность трассы, затраты времени и скорость по всему ряду наблюдений.

Общая схема реализации алгоритма та же, что при алгоритме 1 (рис. 1).

Для проверки работы алгоритма 2 был выполнен тестовый расчет (табл. 3).

Таблица 3

Тестовый расчет климатических изменений условий плавания

Год	Ледокол «Ермак»							Караван л/к «Ермак» + д/э «Амгуема»						
	L, мили	T, сут.	T _{min}	T _{max}	V, узлы	V _{min}	V _{max}	L, мили	T, сут.	T _{min}	T _{max}	V, узлы	V _{min}	V _{max}
1979	527	2,8	2,6	2,9	7,8	7,6	8,4	527	4,6	4,1	4,8	4,8	4,6	5,3
1980	636	5,6	4,6	6,5	4,8	4,1	5,8	636	9,4	7,8	10,8	2,8	2,5	3,4
1981	573	5,1	3,7	5,8	4,8	4,1	6,4	573	9,0	6,3	10,6	2,7	2,3	3,8
1982	532	1,7	1,7	1,7	13,0	12,8	13,4	532	2,1	2,0	2,2	10,4	10,1	10,9
1983	558	4,5	4,0	4,7	5,2	4,9	5,8	558	7,8	6,9	8,4	3,0	2,8	3,4
1984	616	5,9	4,2	7,5	4,5	3,4	6,0	616	10,1	7,2	12,2	2,6	2,1	3,5
Среднее	574	4,2			6,7			574	7,2			4,4		

Полученные результаты тестирования разработанных алгоритмов для различных типов судов и ледоколов позволяют надеяться на перспективность выбранного направления при исследовании климатических изменений условий плавания, а также выборе оптимальных вариантов движения при планировании арктических морских транспортных операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бузуев А.Я. Влияние природных условий на судоходство в замерзающих морях. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 200 с.
- Бузуев А.Я., Федяков В.Е. Вероятностная оценка повторяемости условий возникновения ветрового сжатия льда в зимний период // Труды ААНИИ. 1979. Т. 364. С. 70–74.
- Воеводин В.А. Особенности ветрового сжатия льда в Северном Ледовитом океане // Труды ААНИИ. 1977. Т. 354. С. 97–103.
- Горбунов Ю.А., Лосев С.М. Об исследовании разрывов в сплошном ледяном покрове по материалам радиолокационных съемок // Проблемы Арктики и Антарктики. 1975. № 46. С. 29–33.
- Соболь И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.
- Bradford J.D. Preliminary Report of the Observation Sea Ice Pressure and its Effect on Merchant Vessels under Icebreaker Escort // «Sea Ice», Proceedings of an International Conference, Reykjavik, Iceland, May 10–13, 1972. P. 241–245.
- Frolov S.V., Klyachkin S.V. The Influence Of Leads Orientation Relative To The General Ship (Icebreaker) Course Upon The Speed And Efficiency Of Ice Navigation // Proceedings of POAC'99, 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, Helsinki, Finland, August 23–27. 1999. Espoo, 1999. Vol. 2. P. 561–567.

V.E.FEDYAKOV, S.V.FROLOV

THE NEW ALGORITHMS OF STATISTICAL MODELING TO DESCRIBE POSSIBLE CHANGES OF DIFFICULTIES APPEARED DURING THE ICE NAVIGATION ARE PRESENTED IN THE ARTICLE

One of them can be used to calculate the most possible and limits of the possible changes of time consumption and average ship speeds if some sea ice characteristics are determined. The second algorithm is developed to calculate distribution of parameters, characterized difficulties of ice navigation. This algorithm is used during the study of climate changeability of the ice cover along the present or perspective navigational routes if factual information is limited.

Key words: conditions of ice navigation, exploitation parameters, climate changes, statistical modeling, Monte-Carlo method.

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ НАРУШЕНИЙ СПЛОШНОСТИ ЛЬДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ В АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

зав. лаб. С.В.ФРОЛОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: svf@aari.ru

Тип ориентации разрывов в ледяном покрове относительно генерального курса движения ледокола является одной из важнейших ледовых характеристик плавания в Арктическом бассейне. Данные специальных судовых ледовых наблюдений, выполненных в морских высокоширотных экспедициях, позволили определить зоны, движение судна в которых наиболее эффективно, получить соотношения между типом ориентации разрывов и средней скоростью движения судна, временем, затраченным на работу набегам. Получена эмпирическая зависимость между шириной разрывов и специальным критерием – индексом разрыва для различных типов их ориентации по отношению к генеральному курсу движения судна. Предложены алгоритмы учета типа ориентации разрывов для расчета скорости движения судна во льдах как при автономном движении, так и для проводки судна ледоколом.

Ключевые слова: Арктический бассейн, нарушение сплошности ледяного покрова, индекс разрыва, скорость движения судна, модель движения судна во льдах.

Практика гидрометеорологического обеспечения высокоширотных плаваний в Арктическом бассейне позволила установить, что одной из важнейших ледовых характеристик условий плавания является тип ориентации нарушений сплошности ледяного покрова (НСЛ) относительно генерального курса движения ледокола. Под термином НСЛ подразумеваются разрывы, трещины, каналы в ледяном покрове. Выделено пять основных типов [Макаров, Фролов, 1997; Фролов, 1997].

Тип А – зона «ориентированных» НСЛ: преобладающая ориентация системы НСЛ и генеральный курс движения ледокола совпадают или различаются не более чем на 30°. Движение ледокола носит устойчивый характер и осуществляется в основном по НСЛ с преодолением отдельных стыков полей и неровностей кромок каналов и разводий.

Тип В – зона «неориентированных» НСЛ: степень ориентированности НСЛ невелика или преобладающая ориентация НСЛ отличается от генерального курса движения ледокола более чем на 30°. Движение ледокола в этой зоне менее устойчивое, чем в зоне типа А, и сочетает в себе плавание непосредственно по разрывам и каналам с необходимостью преодоления перемычек сплоченного льда (крупных полей и сморозей льда) при переходе из одной системы НСЛ в другую.

Тип С – зона повышенной раздробленности ледяного покрова: плавание носит устойчивый характер и осуществляется по зоне, как правило, ориентированной, с преобладанием битых форм ледяного покрова (количество ледяных полей составляет менее 5 баллов).

Тип D – зона отсутствия НСЛ: движение ледокола осуществляется в сплошном льду сплоченностью 10 баллов, преобладающие формы которого – ледяные поля. Характер движения ледокола в этой зоне определяется сочетанием «традиционных» характеристик ледяного покрова (толщины, торосистости и т.п.).

Тип E – зона пониженной сплоченности ледяного покрова: четко выраженные системы НСЛ отсутствуют, движение ледокола происходит в равномерно распределенном по акватории льду сплоченностью 8 баллов и менее. Зоны этого типа характерны для прикромочных районов.

Необходимо отметить, что наличие систем НСЛ в ледяном покрове характерно для Арктического бассейна в течение всего года. В течение летнего периода средняя ширина НСЛ меняется в широких пределах. Целесообразно рассмотреть повторяемость средней ширины НСЛ в следующих диапазонах:

- 25 м и менее – трещины, очень узкие разрывы в ледяном покрове, средняя ширина НСЛ меньше ширины судна;
- 25–50 м – узкие разводья и разрывы в ледяном покрове, средняя ширина НСЛ сопоставима с шириной судна;
- 50–100 м – средняя ширина НСЛ превышает ширину судна;
- 100–500 м – средние разводья и разрывы в ледяном покрове;
- 500–1000 м – крупные разводья, разрывы и каналы. НСЛ этого и следующего диапазона надежно идентифицируются по снимкам ИСЗ низкого и среднего разрешения;
- более 1000 м – обширные разводья и каналы значительной протяженности.

Средняя ширина НСЛ в период июль–сентябрь изменяется в соответствии с общими процессами разрушения ледяного покрова в летний период: минимальная ширина НСЛ отмечается в июле, максимальная – в августе, далее, в сентябре, наблюдается уменьшение ширины НСЛ (табл. 1). Так, в июле преобладающие значения средней ширины НСЛ не превышают 50 м (79 %). В августе около трети разрывов имеют ширину, превышающую 100 м (34 %), а количество НСЛ с шириной не более 50 м сокращается до 49 %. В сентябре количество средних и крупных НСЛ на пути плавания судов несколько сокращается (до 23 %), а НСЛ, ширина которых соизмерима с шириной ледокола или меньше ее, возрастает до 61 % (табл. 1).

Следует отметить, что количество крупных НСЛ и магистральных разрывов, уверенно идентифицирующихся по снимкам ИСЗ низкого разрешения (шириной более 500 м), на пути плавания судов в Арктическом бассейне в течение летнего периода составляет незначительное количество – 7 % в июле, 11 % в августе и 4 % в сентябре.

Наиболее широкие НСЛ характерны для зон типа А. Около 34 % пути плавания в этих зонах осуществляется по НСЛ шириной более 500 м. Это объясняется тем, что

Таблица 1

Распределение ширины НСЛ на пути плавания судов в Арктическом бассейне в летний период, %

Месяц	Ширина НСЛ, м					
	0–25	25–50	50–100	100–500	500–1000	>1000
Июль	55	24	7	7	5	2
Август	28	21	17	23	5	6
Сентябрь	22	39	16	19	3	1

**Распределение ширины НСЛ различных типов в Арктическом бассейне
в летний период, %**

Тип зоны	Ширина НСЛ, м					
	0–25	25–50	50–100	100–500	500–1000	>1000
A	2	10	19	36	12	22
B	26	27	20	24	2	1
C	49	26	9	16	0	0

судоводители предпочитают максимально использовать более крупные НСЛ, ориентированные в направлении генерального курса судна. Максимальное количество НСЛ шириной не более 25 м наблюдается в зонах повышенной раздробленности (тип С), минимальное – в зонах типа А (табл. 2). Распределение ширины НСЛ в зонах «неориентированных» НСЛ (тип В) носит промежуточный характер между аналогичными распределениями зон типа А и С. Данный факт объясняется нецелесообразностью использования средних и даже крупных НСЛ в том случае, если их преобладающая ориентация значительно отличается от генерального курса движения судна. Следует отметить, что в летний период специальными судовыми наблюдениями крупные НСЛ в зонах повышенной раздробленности не зафиксированы.

Очевидно, что ширина НСЛ и их количество оказывает влияние на распределение сплоченности льда на пути плавания судна. Данные судовых специальных наблюдений убедительно показывают, что при одинаковой ширине НСЛ тип их ориентации существенно влияет на значения сплоченности льда на пути плавания судна.

Оценка количества НСЛ в состав специальных наблюдений не входила, тем не менее полученные соотношения позволяют использовать информацию о преобладающей ширине НСЛ для оценки сплоченности льда на пути плавания. Эти зависимости в целом неплохо аппроксимируются экспоненциальной функцией:

$$- \text{ для зон типа А: } B_L = 9568,5e^{-0,5171C}; \quad (1)$$

$$- \text{ для зон типа В: } B_L = 258793e^{-0,9166C}, \quad (2)$$

где B_L – средняя ширина НСЛ (м), C – сплоченность льда на пути плавания (баллы).

Зависимость сплоченности льда от средней ширины НСЛ в зонах типа С аппроксимируется полигональной функцией:

$$B_L = 25,492^2 - 995,72C + 4743,9, \quad (3)$$

где B_L – средняя ширина НСЛ (м), C – сплоченность льда на пути плавания (баллы).

Эксплуатационная скорость движения ледокола является интегральной характеристикой системы взаимодействия лед – судно, отражающей эффективность его использования во льдах [Гордиенко и др., 1967]. Сравнение распределений скорости позволяет определить типы зон с различной ориентацией НСЛ относительно генерального курса судна, движение по которым наиболее эффективно.

Наиболее благоприятными являются зоны пониженной сплоченности (тип Е). Плавание судна в этих зонах обычно лимитируется горизонтальной видимостью. Очевидно, что наименее благоприятными для судоходства являются зоны с отсутствием НСЛ (тип D). Скорость движения судна в зонах этого типа зависит преимущественно от толщины льда, его торосистости и разрушенности (в летний период). Использование любых НСЛ, проявляющихся как в виде разрывов, каналов, трещин в ледяном

покрове, так и в виде ориентированных зон с повышенной раздробленностью льда, существенно повышает скорость движения судна при прочих равных характеристиках ледяного покрова (табл. 3–5).

Таблица 3

Распределение скорости автономного движения а/л типа «Арктика» в зонах с различной ориентацией НСЛ в Арктическом бассейне в летний период, %

Тип зоны	Скорость движения судна, узлы										
	0–2	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20	>20
A	0	1	4	10	18	19	20	13	11	1	3
B	0	1	4	14	24	24	18	13	2	1	0
C	0	1	4	11	21	28	16	13	3	2	2
D	4	17	20	13	27	12	7	0	0	0	0

Таблица 4

Распределение скорости плавания транспортного судна типа НЭС «Академик Федоров» под проводкой а/л типа «Арктика» в зонах с различной ориентацией НСЛ в Арктическом бассейне в летний период, %

Тип зоны	Скорость движения каравана, узлы										
	0–2	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20	>20
A	0	3	3	11	31	32	16	3	1	0	0
B	0	3	9	24	36	21	6	0	0	0	0
C	0	2	7	16	30	36	6	3	0	0	0
D	5	13	19	25	27	10	0	0	0	0	0

Таблица 5

Распределение скорости автономного плавания транспортного судна типа НЭС «Академик Федоров» в зонах с различной ориентацией НСЛ в Арктическом бассейне в летний период, %

Тип зоны	Скорость движения каравана, узлы										
	0–2	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20	>20
A	1	6	15	33	25	18	2	0	0	0	0
B	7	15	39	24	9	7	0	0	0	0	0
C	3	13	24	27	24	8	0	0	0	0	0
D	44	26	5	8	17	0	0	0	0	0	0

Данные специальных судовых ледовых наблюдений убедительно показывают, что эффективность использования судами зон с различным типом ориентации НСЛ зависит от мощности СЭУ: чем больше мощность СЭУ, тем меньше влияние ориентации НСЛ на скорость движения (табл. 6). Использование НСЛ повышает скорость автономного плавания атомного ледокола типа «Арктика» в среднем на 51–66 %, а автономного плавания транспортного судна типа «Академик Федоров» – на 60–123 %.

Анализ данных, представленных в таблицах 3–6, позволяет установить, что из зон с наличием НСЛ наиболее благоприятными для эффективного движения судов являются зоны типа А, когда ориентация НСЛ совпадает с генеральным курсом плавания. Использование зон этого типа повышает скорость автономного плавания атомного ледокола типа «Арктика» в среднем на 4,7 узла, скорость проводки ледоколом транспортного судна – на 3,3 узла, а автономного плавания судна типа НЭС

Таблица 6

**Характеристики эффективности движения судов в зонах с различной ориентацией
НСЛ в Арктическом бассейне в летний период**

Тип зоны	А/л типа «Арктика» (автономно)			А/л типа «Арктика» и НЭС «Академик Федоров»			НЭС «Академик Федоров» (автономно)		
	$V_{\text{ср}}$, узлы	$L (<6)$, %	$L (>10)$, %	$V_{\text{ср}}$, узлы	$L (<6)$, %	$L (>10)$, %	$V_{\text{ср}}$, узлы	$L (<6)$, %	$L (>10)$, %
A	11,8	4,9	66,6	10,0	5,8	52,2	7,8	21,3	20,4
B	10,7	5,2	56,9	8,6	12,4	27,4	5,6	60,9	6,5
C	11,2	4,6	63,9	9,4	9,8	44,9	6,6	40,3	8,3
D	7,1	40,7	18,9	6,7	37,3	10,0	3,5	75,5	0,0

Примечание: $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения в зоне, $L (<6)$ – относительная протяженность пути плавания со скоростью 6 узлов и менее, $L (>10)$ – относительная протяженность пути плавания со скоростью более 10 узлов.

«Академик Федоров» – на 4,3 узла (в 2,2 раза). При этом как при автономном плавании ледокола, так и при проводке им судна более половины пути суда движутся со скоростью, превышающей 10 узлов (табл. 6).

Несколько менее благоприятным, но все же достаточно эффективным является использование ориентированных зон с повышенной раздробленностью ледяного покрова (тип С). Однако если эксплуатационные показатели автономного движения атомного ледокола и проводки им транспортного судна в зонах этого типа близки к показателям движения в зонах типа А, то показатели автономного плавания судна типа НЭС «Академик Федоров» в зонах типа С существенно уступают показателям плавания в зонах типа А. Относительная протяженность пути судна со скоростью более 10 узлов в зонах повышенной раздробленности сокращается до 8 %, а со скоростью 6 узлов и менее увеличивается до 40 %.

Наименее благоприятными из зон с наличием НСЛ являются зоны, ориентация НСЛ в которых не совпадает с генеральным курсом плавания судна или система НСЛ не имеет четко выраженной ориентации (тип В). Движение судов в зонах этого типа отличается наименьшими средними скоростями, наименьшей протяженностью плавания со скоростью более 10 узлов и наибольшей – со скоростью 6 узлов и менее (см. табл. 6).

Другим важным показателем трудности плавания является вероятность работы судна набегами. Для ее оценки используется значение относительного количества набегов (количество набегов на 100 миль пути). Средние значения этого параметра для различных типов зон представлены в табл. 7. Использование НСЛ при движении судов во льдах Арктического бассейна резко сокращает вероятность работы набегами. Вместе с тем значение этого показателя зависит от мощности СЭУ.

Таблица 7

**Относительное количество набегов в зонах с различной ориентацией НСЛ
(количество набегов на 100 миль пути)**

Тип зоны	А/л типа «Арктика» (автономно)	НЭС «Академик Федоров» (автономно)
A	4,3	7,5
B	4,9	40,7
C	4,7	30,2
D	83,4	266,8

Данные, представленные в табл. 7, показывают, что наиболее равномерное движение судов во льдах с наличием НСЛ характерно для плавания в зонах типа А. Вероятность работы набегами максимальна при движении судов в зонах типа В. Это связано с необходимостью преодоления сжатых стыков ледяных полей, тяжелых перемычек льда при переходе судна между разрывами и трещинами в ледяном покрове.

Отмеченные особенности плавания с использованием НСЛ могут и должны учитываться при планировании конкретной морской операции.

При планировании морских операций во льдах Арктического бассейна в числе прочих подготовительных мероприятий оценивается фактическое и прогностическое распределение ледяного покрова в районе плавания по данным спутниковых снимков, с помощью которых можно получить информацию об общей сплоченности льда, его возрастном составе (что эквивалентно грубой оценке распределения толщины), преобладающих размерах льдин, торосистости, разрушенности, а также наличии и ориентации разрывов. В принципе этого достаточно для того, чтобы оценить ожидаемую скорость движения ледокола заданного типа или стандартного каравана. Для этого можно использовать эмпирико-статистическую модель оценки трудности плавания судов во льдах [Бузуев, 1982]. В методических указаниях по использованию эмпирико-статистической модели движения судна во льдах предложен способ учета самого факта наличия разрывов путем введения дополнительного коэффициента, зависящего только от одного типа ледокола (атомного ледокола типа «Арктика») и каравана, состоящего из указанного типа ледокола и одного судна типа СА-15. Причем величина этого коэффициента одинакова как для автономного движения ледокола, так и для каравана и равна 1,11.

В то же время, как показано выше, необходимо учитывать не только и не столько наличие, сколько преобладающую ориентацию разрывов. В противном случае расчет скорости движения неизбежно будет содержать существенные ошибки.

Учесть влияние НСЛ, а также их преобладающей ориентации на скорость плавания можно двумя способами.

Первый способ заключается в оценке ледовых условий на предполагаемом пути плавания судов, он включает:

- оценку стандартного комплекса характеристик ледяного покрова в районе предполагаемого плавания по данным снимков ИСЗ, авиационной ледовой разведки или результатам расчетов;
- определение типов зон НСЛ, а также их протяженности;
- оценку преобладающей ширины НСЛ в зонах с различным типом ориентации НСЛ относительно генерального курса движения судна;
- преобразование значений общей сплоченности льда, зафиксированной в районе плавания, в значения сплоченности на пути движения судов с учетом ориентации НСЛ, используя (1–3);
- расчет скорости движения судна или каравана судов с помощью эмпирико-статистической модели движения судна во льдах (или какой-либо иной модели движения судна во льдах). При расчетах используются «преобразованные» значения общей сплоченности льда с учетом преобладающей ширины и ориентации НСЛ.

Второй способ основан на использовании критерия, предложенного в [Liljeström, 1994]. Этот критерий, позволяющий оценить эффективность использования НСЛ и названный «lead index» (индекс НСЛ), определяет время, затраченное на плавание судна по чистой воде и начальным (молодым) льдам при использовании НСЛ.

Индекс НСЛ определяется в тех случаях, когда судно движется по чистой воде или оба борта судна не контактируют со льдом толще 20 см. Индекс рассчитывается как отношение времени плавания по чистой воде или начальным (молодым) льдам к общему времени плавания в однородной ледовой зоне:

$$I_{\text{НСЛ}} = T_{\text{НСЛ}} / T_{\text{об}}, \quad (4)$$

где: $I_{\text{НСЛ}}$ – индекс НСЛ, $T_{\text{НСЛ}}$ – общее время движения судна в однородной ледовой зоне, $T_{\text{об}}$ – время движения судна по чистой воде или начальным (молодым) льдам.

Специальные судовые ледовые наблюдения, выполненные в ходе высокоширотных морских экспедиций в 2000–2008 гг., позволили определить значения этого индекса для зон с различным типом ориентации НСЛ. Наблюдения выполнялись во время автономного плавания НЭС «Академик Федоров» и при его проводке атомным ледоколом типа «Арктика».

Таблица 8

Средние значения индекса НСЛ для типовых зон		
Тип зоны	А/л типа «Арктика» и НЭС «Академик Федоров»	НЭС «Академик Федоров» (автономно)
А	0,41	0,40
В	0,10	0,19
С	0,07	0,07

Средние значения индекса НСЛ, представленные в табл. 8, показывают, что при использовании зон типа А, около 40 % пути суда движутся практически по чистой воде или молодым льдам. Различия в значениях индекса НСЛ при автономном плавании транспортного судна и при его проводке атомным ледоколом в зонах типа В объясняются более избирательным характером автономного движения судна вследствие меньшей мощности судовой энергетической установки.

Очевидно, что значение индекса зависит от ширины НСЛ и их протяженности.

Зависимость индекса от ширины НСЛ в целом неплохо аппроксимируется логарифмической функцией. При движении каравана в составе а/л типа «Арктика» и НЭС «Академик Федоров» получены следующие зависимости:

$$\text{– для зон типа А: } I_{\text{НСЛ}} = 0,1805 \ln(B) - 0,4737; \quad (5)$$

$$\text{– для зон типа В: } I_{\text{НСЛ}} = 0,1067 \ln(B) - 0,3434; \quad (6)$$

$$\text{– для зон типа С: } I_{\text{НСЛ}} = 0,095 \ln(B) - 0,03095, \quad (7)$$

где $I_{\text{НСЛ}}$ – индекс НСЛ, B – ширина НСЛ, м.

Эти же зависимости представлены графически на рис. 1–3.

Для автономного движения НЭС «Академик Федоров» соответствующие аппроксимирующие функции выглядят следующим образом:

$$\text{– для зон типа А: } I_{\text{НСЛ}} = 0,2319 \ln(B) - 0,6807; \quad (8),$$

$$\text{– для зон типа В: } I_{\text{НСЛ}} = 0,1589 \ln(B) - 0,4917; \quad (9),$$

$$\text{– для зон типа С: } I_{\text{НСЛ}} = 0,1302 \ln(B) - 0,4402. \quad (10).$$

Необходимо отметить, что аппроксимация произведена для НСЛ шириной не менее 25 м (то есть более ширины судна и ледокола), потому что для НСЛ с меньшей шириной индекс НСЛ равен нулю.

По известному распределению характеристик ледяного покрова в районе плавания выделяются зоны с различным типом ориентации разрывов, а также оцениваются

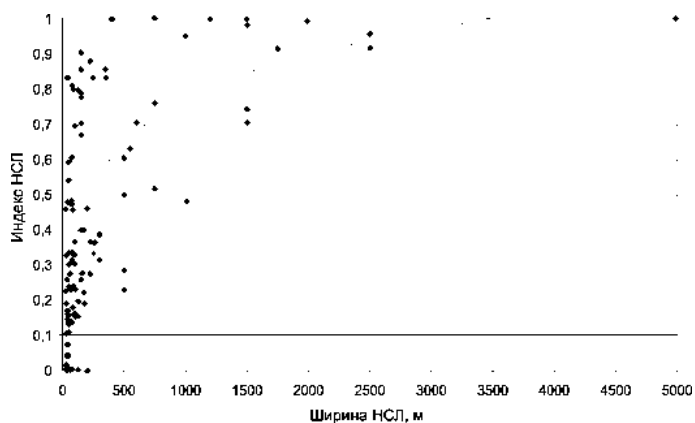


Рис. 1. Зависимость индекса НСЛ от их ширины в зонах типа А при движении каравана в составе а/л типа «Арктика» и НЭС «Академик Федоров».

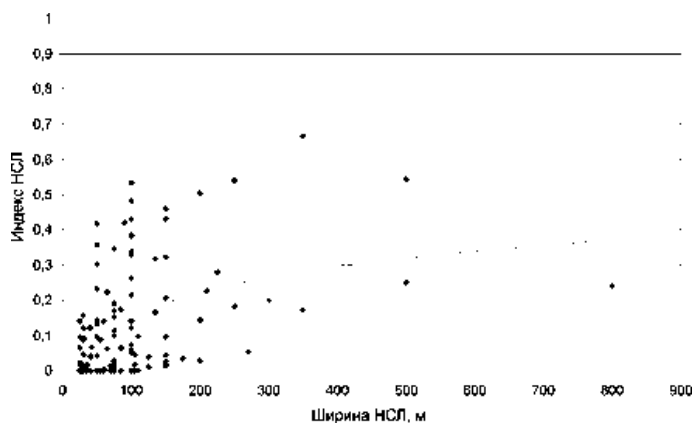


Рис. 2. Зависимость индекса НСЛ от их ширины в зонах типа В при движении каравана в составе а/л типа «Арктика» и НЭС «Академик Федоров».

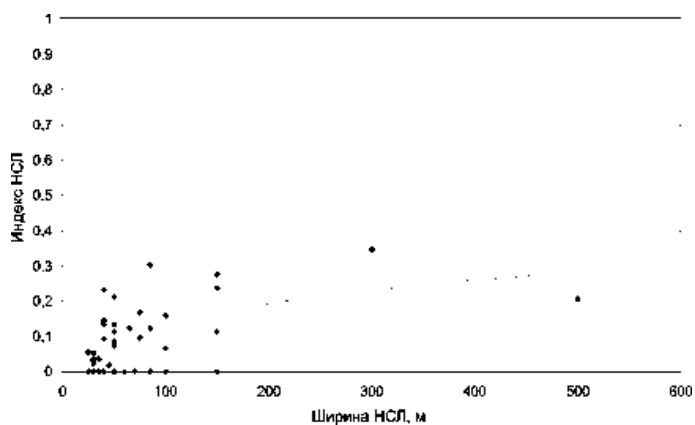


Рис. 3. Зависимость индекса НСЛ от их ширины в зонах типа С при движении каравана в составе а/л типа «Арктика» и НЭС «Академик Федоров».

их протяженности. Затем с помощью соотношений (5)–(10) определяется индекс НСЛ зон каждого типа.

Далее с помощью эмпирико-статистической модели (или любой иной модели движения судна во льдах) оценивается скорость движения V_D в зоне, где вообще нет разрывов (тип D), а также скорость движения непосредственно в разрыве $V_{НСЛ}$ (по чистой воде или молодым льдам). Расчет значений скорости V_D осуществляется с учетом всех характеристик ледяного покрова, зафиксированных на ледовой карте (количества льдов различного возраста, толщины льда, торосистости, разрушенности, форм льда и т.п.).

Оценка скорости движения в зонах с отчетливо выраженной структурой НСЛ (тип А и тип В), а также в зонах повышенной раздробленности ледяного покрова (тип С) выполняется с использованием индекса НСЛ каждой из этих зон. Поскольку в зонах типа А, В и С часть времени судно движется по ледяному покрову, в котором отсутствуют НСЛ, что аналогично типу D, а часть – непосредственно по разрыву, то средняя скорость движения в этих типах зон определяется как средневзвешенная величина [Frolov, Klyachkin, 1999]:

$$V_A = V_D(1 - I_{НСЛ(A)}) + V_0 I_{НСЛ(A)}; \quad (11)$$

$$V_B = V_D(1 - I_{НСЛ(B)}) + V_0 I_{НСЛ(B)}; \quad (12)$$

$$V_C = V_D(1 - I_{НСЛ(C)}) + V_0 I_{НСЛ(C)}, \quad (13)$$

где V_A , V_B , V_C , V_D – средние скорости движения судна в зонах различного типа; V_0 – скорость движения судна по чистой воде или молодым льдам; $I_{НСЛ(A, B, C)}$ – индекс НСЛ зоны соответствующего типа.

Практика плавания в зонах с наличием НСЛ позволила установить, что скорость движения судов по чистой воде или начальным (молодым) льдам существенно меньше значений эксплуатационной скорости, применяемой в эмпирико-статистической модели ААНИИ. Это связано в первую очередь с тем, что при движении по НСЛ судоводители ограничивают скорость судна для уменьшения нагрузок на его корпус при соприкосновении с кромками разрывов или при предстоящем преодолении ледовых перемычек между НСЛ (табл. 9).

Таблица 9

Средние значения эксплуатационной скорости движения судов по чистой воде или начальным (молодым льдам) при использовании НСЛ, узлы

Суда	Эмпирико-статистическая модель ААНИИ	Тип зоны			
		А		В	С
		Ширина НСЛ больше 1000 м	Ширина НСЛ меньше 1000 м		
А/л типа «Арктика» – НЭС «Академик Федоров»	15,0	11,6	10,0	9,1	9,0
НЭС «Академик Федоров» (автономно)	15,0	9,7	9,1	6,0	5,9

Этот алгоритм был применен для расчета скорости движения судов по данным экспедиций «Арктика-2000» (для автономного плавания НЭС «Академик Федоров») и «Арктика-2004» (для каравана в составе а/л типа «Арктика» и НЭС «Академик Федоров»). Средние скорости движения судов, рассчитанные для каждого типа зон

по предложенному алгоритму, более соответствуют фактическим, чем скорости, рассчитанные с использованием алгоритма, заложенного в эмпирико-аналитической модели (табл. 10).

Таблица 10

**Расчетные и фактические скорости движения судов для зон
с различным типом ориентации НСЛ**

Суда	Тип зоны	V_{ϕ} , узлы	V_M , узлы	E_M , %	V_A , узлы	E_A , %
А/л типа «Арктика» + НЭС «Академик Федоров»	A	9,3	7,4	-20,4	8,8	-5,4
	B	8,3	6,7	-19,3	8,5	2,4
	C	8,2	6,8	-17,1	7,7	-6,1
НЭС «Академик Федоров» (автономно)	A	6,9	5,7	-17,4	6,7	-2,9
	B	5,2	4,5	-13,5	5,5	5,8
	C	5,1	4,6	-9,8	4,7	-7,8

Примечание: V_{ϕ} – фактическая эксплуатационная скорость; V_M – эксплуатационная скорость, рассчитанная по алгоритму эмпирико-статистической модели; V_A – эксплуатационная скорость, рассчитанная с использованием предложенного алгоритма; E_M – средняя ошибка расчета по алгоритму эмпирико-статистической модели; E_A – средняя ошибка расчета по предложенному алгоритму

Материалы наблюдений, полученные в ходе высокоширотных экспедиций, подтвердили тезис о необходимости учета ориентации НСЛ при расчете скорости движения судна во льдах. Разработанный алгоритм с использованием индекса НСЛ позволяет произвести этот расчет более качественно. Однако наибольшая трудность заключается в априорной оценке индекса НСЛ. Дело в том, что по снимку ИСЗ можно идентифицировать нарушения сплошности ледяного покрова, размеры которых больше или равны разрешающей способности данного снимка. Зачастую крупный разрыв или разводье в ледяном покрове, различимый на снимке, представляет из себя множество разрывов меньших размеров, расположенных близко друг от друга [Горбунов и др., 2008]. Если информация высокого разрешения является доступной, то можно непосредственно по снимку оценить статистические характеристики ансамбля мелких разрывов и по ним достаточно уверенно определить индекс НСЛ конкретных участков выбранного маршрута плавания. Существенную помощь в оценке значений индекса НСЛ могут оказать данные авиационной ледовой разведки, предоставляющие необходимые сведения о типе НСЛ, их преобладающей ширине и других параметрах ледяного покрова на выбранном маршруте плавания.

При наличии информации среднего или низкого разрешения возникает задача поиска соответствия между характеристиками крупного разрыва, видимого на снимке, и статистическими характеристиками системы мелких разрывов, которые в действительности формируют этот видимый крупный разрыв. Однако решение этой задачи требует постановки и проведения соответствующего подспутникового эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бузуев А.Я. Влияние природных условий на судоходство в замерзающих морях. Л.: Гидрометеониздат, 1982. 200 с.
- Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н., Лосев С.М., Фролов С.В. Среднесрочные прогнозы крупных нарушений сплошности льда при гидрометеорологическом обеспечении мореплавания в Арктическом бассейне // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 78–86.

Гордиенко П.А., Бузуев А.Я., Сергеев Г.Н. Изучение ледяного покрова моря как среды судоходства // Проблемы Арктики и Антарктики. 1967. Вып. 27. С. 93–104.

Макаров Е.И., Фролов С.В. Проблема специализированного гидрометеорологического обеспечения высокоширотного судоходства во льдах Арктики и реалии ее решения // Проблемы Арктики и Антарктики. 1997. № 71. С. 129–147.

Фролов С.В. Основные закономерности распределения характеристик ледяного покрова и их влияние на движение ледокола в Арктическом бассейне в летний период (по данным высокоширотных плаваний) // Труды ААНИИ. 1997. Т. 437. С. 83–98.

Frolov S.V., Klyachkin S.V. The Influence Of Leads Orientation Relative To The General Ship (Icebreaker) Course Upon The Speed And Efficiency Of Ice Navigation // Proceedings of POAC'99, 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, Helsinki, Finland. Vol. 1. P. 561–567.

Liljestrom G. Trafficability Data from the 1991 International Arctic Ocean Expedition // Proceedings of ICETECH'94. Calgary, 1994. P. R11–R18.

S.V.FROLOV

**ORIENTATION OF THE LEADS AND CRACKS IN THE ICE COVER
RELATIVELY TO DIRECTION OF THE SHIP MOVEMENT IS THE MOST
IMPORTANT CHARACTERISTIC OF ICE NAVIGATION
IN THE ARCTIC BASIN**

Data of special shipborne observations, carried out in high-latitudinal expeditions, allowed to determine areas of most effective ship movement and allowed to calculate relations between orientation of the leads and cracks and average ship speed, and time when ship stuck. The empirical relation between width of leads and special criteria – lead index – for different types of the leads orientation relatively to the general ship direction was obtained. The algorithms of calculation the ship speed in ice, depending on the type of leads orientation, as for autonomic movement as for the ship assisted by icebreaker were developed.

Keywords: Arctic Basin, leads and cracks, lead index, ship speed, model of ship navigation in ice.

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КРУПНОТОННАЖНЫХ ГАЗОВОЗОВ ДЛЯ АРКТИКИ

д-р техн. наук Л.Г.ЦОЙ, д-р техн. наук А.В.АНДРЮШИН,
ст. науч. сотр. А.А.ШТРЕК

Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота (ЗАО «ЦНИИМФ»), Санкт-Петербург, e-mail: llt@cniimf.ru

Для обеспечения круглогодичного вывоза добываемого на арктическом шельфе природного газа в рамках перспективных проектов необходимо создание специальных газозовов активного ледового плавания с высокими ледовыми классами, которые могут обеспечить эффективную и безопасную транспортировку сжиженного природного газа в тяжелых ледовых условиях арктических морей. В статье рассматриваются возможные сценарии эксплуатации газозовов в Арктике – как с использованием ледокольной проводки, так и их самостоятельное плавание во льдах. Проектирование перспективных арктических газозовов должно основываться на современных тенденциях строительства и эксплуатации ледокольно-транспортных судов высоких ледовых классов. Излагаются требования к ледовой ходкости и маневренности во льдах, исходя из предполагаемых сценария плавания и района эксплуатации. Приводится методика оценки влияния ледовых сжатий на ходкость крупнотоннажных газозовов во льдах. Даются рекомендации по выбору формы обводов корпуса, мощности и типа пропульсивной установки применительно к круглогодичной эксплуатации газозова. На основании анализа накопленного опыта эксплуатации крупнотоннажных арктических танкеров и результатов модельных и натурных испытаний сформулированы основные требования к проектированию пропульсивных комплексов перспективных арктических газозовов.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, арктический газозов, маневренность во льдах, влияние ледовых сжатий, форма обводов корпуса, пропульсивный комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

В ноябре 2012 г. впервые в истории была осуществлена перевозка сжиженного природного газа (СПГ) по Северному морскому пути (СМП). Транспортировка была выполнена газозовом «Ob River» под проводкой двух атомных ледоколов в период начала интенсивного ледообразования. Всего по трассе Севморпути пройдено примерно 2600 миль практически за 9 суток со средней скоростью около 12 узлов, из них в молодых льдах – около 1720 миль за 6 суток с той же средней скоростью 12 узлов. По результатам экспериментального рейса можно сделать вывод о практической осуществимости транзитных перевозок СПГ по Северному морскому пути в летне-осенний период навигации крупнотоннажными газозовами соответствующих ледовых классов под проводкой линейных ледоколов. При этом надо отметить, что сложившиеся в первой половине ноября ледовые условия в арктических морях были легче среднемультилетних и положительно сказались на скоростях проводки и времени прохождения газозова по трассам СМП [Штрек, 2013].

В то же время для обеспечения круглогодичного вывоза добываемого на арктическом шельфе природного газа необходимо создание газозовов активного ледового плавания с высоким ледовым классом, которые могут обеспечить надежную и безопасную транспортировку СПГ в зимних льдах арктических морей.

ВОЗМОЖНЫЕ СЦЕНАРИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Выбор концептуального подхода к проектированию судна определяется в зависимости от предполагаемого варианта его плавания во льдах: под проводкой ледокола или самостоятельно. Самостоятельное плавание, в свою очередь, может осуществляться как традиционным способом – носом вперед, так и по принципу «двойного действия» – кормой вперед (предложенная финской компанией Aker Arctic концепция DAS – Double Acting Ship).

В первом варианте судно будет иметь ледовый класс и мощность пропульсивной установки ниже, чем требуется для его самостоятельной эксплуатации, поскольку ему требуются меньшие энергозатраты. Однако при этом следует принимать во внимание, что ширина существующих ледоколов не превышает 28 м, что существенно меньше характерной для крупнотоннажных газозовов ширины 45–50 м. Следовательно, либо потребуются использование двух ледоколов, совместно прокладывающих канал требуемой ширины, либо судно будет двигаться в узком канале за одним ледоколом, доламывая кромки канала, для чего необходимо увеличение мощности ведомого судна. Ледокольная проводка судов осуществляется двумя основными способами: лидированием и на буксире вплотную. Для крупнотоннажных газозовов единственным вариантом проводки является первый способ, второй способ практически неосуществим как из-за высокого надводного борта, так и невозможности обеспечения управляемости состава вследствие чрезмерно большой, в сравнении с ледоколом, массы буксируемого судна.

Варианты, предусматривающие самостоятельное плавание, позволяют отказаться от ледокольного сопровождения. При этом само судно должно обладать высокими ледовыми качествами и соответствующим ледовым классом, обеспечивающим ему необходимую безопасность автономного плавания во льдах.

В качестве примера можно привести челночные танкеры типа «Василий Динков», построенные на ледовый класс Arc6 и оборудованные двумя полноповоротными винто-рулевыми колонками (ВРК) Azipod суммарной мощностью 20 МВт. Эти суда осуществляют челночные перевозки сырой нефти с терминала Варандей в юго-восточной части Баренцева моря до плавучего нефтехранилища Белокаменка в Кольском заливе, не пользуясь ледокольным сопровождением на маршруте движения. Ледокольное обеспечение («ice management») им требуется только при операциях швартовки и погрузки у точечного терминала.

Надо отметить, что все построенные в последние годы транспортные суда арктического плавания (челночные танкеры типов «Василий Динков» и «Михаил Ульянов», ледокольно-транспортные суда типа «Норильский Никель», ледокольный танкер «Енисей») оснащены полноповоротными ВРК, позволяющими существенно улучшить их маневренность во льдах.

ТРЕБОВАНИЯ К ЛЕДОПРОХОДИМОСТИ И МАНЕВРЕННОСТИ ВО ЛЬДАХ

На рис. 1 представлены зависимости продолжительности автономного плавания судов от их ледопроходимости и района работы, полученные по результатам статисти-

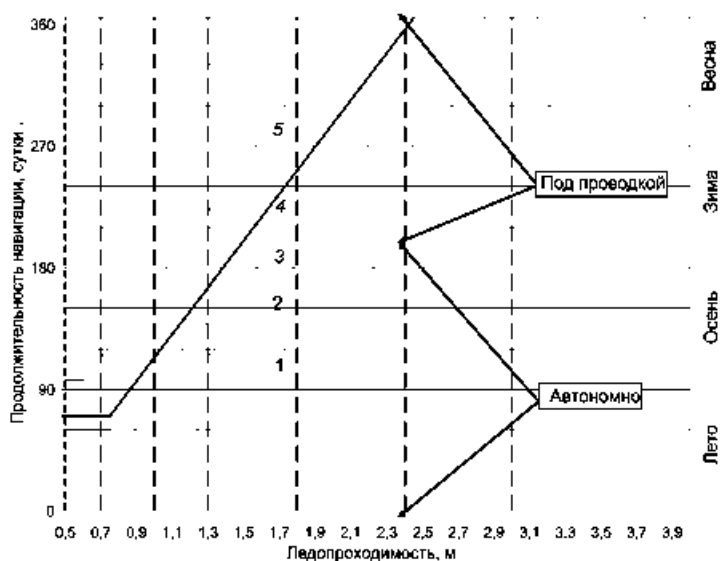


Рис. 1. Зависимость продолжительности автономного плавания ледокольно-транспортных судов в Арктике от ледопроеходимости: 1 – в восточном районе Российской Арктики и при транзитном плавании по Северному морскому пути, 2 – в западном районе Российской Арктики, 3 – в западной части Карского моря, 4 – в юго-западной части Карского моря, 5 – в юго-восточной части Баренцева моря.

ческой обработки данных по многолетней эксплуатации флота на трассах Северного морского пути. При недостаточной ледопроеходимости для круглогодичной самостоятельной работы в заданном районе, то есть в более тяжелых по сравнению с допустимыми по ледопроеходимости условиях, судну потребуется ледокольное обеспечение.

Как следует из рис. 1, ледопроеходимость газовоза для круглогодичного вывоза СПГ с п-ва Ямал, должна быть не менее 2,4 м, что позволит обеспечить его самостоятельное плавание в юго-западной части Карского моря практически в любых ледовых условиях. С наименьшими затратами мощности такая ледопроеходимость может быть обеспечена при условии движения судна в тяжелых льдах задним ходом с использованием возможностей пропульсивного комплекса, состоящего из ВРК.

Необходимая продолжительность плавания под ледокольной проводкой также может быть определена по графику на рис. 1. Например, газовозу для Ямала с ледопроеходимостью 1,3 м ледокольное сопровождение понадобится в течение 6 месяцев в году.

Маневренные характеристики транспортного судна во льдах напрямую влияют на безопасность и эффективность его эксплуатации в условиях зимней навигации и должны учитываться при проектировании. Основным показателем маневренности судна во льдах является радиус его циркуляции. При движении в канале за ледоколом газовоз должен хорошо вписываться в прокладываемый канал. Кроме того, важной характеристикой является способность судна выходить из канала.

Наличие протяженной цилиндрической вставки будет существенно усложнять маневрирование арктического газовоза во льдах. Применение же на рассматриваемом газовозе полноповоротных винто-рулевых колонок позволит существенно улучшить его маневренные характеристики во льдах. Здесь также важно отметить, что газовоз

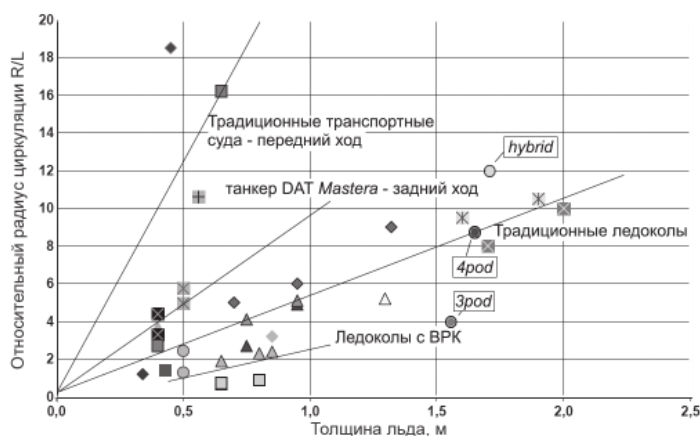


Рис. 2. Сравнение относительных радиусов циркуляции ледоколов и судов ледового плавания в зависимости от толщины льда по данным [Wilkman et al., 2004] и результаты испытаний в ледовых бассейнах моделей крупнотоннажного арктического газовоза.

должен обладать хорошими ледовыми качествами при движении как носом, так и кормой вперед, что позволит ему осуществлять разворот во льдах способом «звездочка» в условиях ограниченной акватории.

Накопленный к настоящему времени опыт эксплуатации в ледовых условиях судов, оборудованных ВРК, позволяет рекомендовать применение таких пропульсивных комплексов для повышения маневренных качеств перспективных крупнотоннажных газовозов, предназначенных для круглогодичной эксплуатации в арктических морях. В качестве примера на рис. 2 приведены данные фирмы Aker Arctic по радиусам циркуляции во льдах различных ледокольно-транспортных судов и ледоколов [Wilkman et al., 2004]. На этом же графике показаны относительные радиусы циркуляции на заднем ходу по результатам модельных испытаний в ледовых бассейнах Aker Arctic в Хельсинки и HSWA в Гамбурге газовоза класса Arc7 шириной около 50 м с различными вариантами пропульсивного комплекса суммарной мощностью на валах 40–45 МВт: гибридным – с двумя бортовыми ВРК и центральной линией вала (модель *hybrid*), из трех ВРК (модель *3pod*) и из четырех ВРК (модель *4pod*).

Как показали результаты модельных испытаний, для рассматриваемого судна оптимальным вариантом, обеспечивающим наилучшие показатели маневренности во льдах, оказался пропульсивный комплекс, состоящий из 3 ВРК. Худшие показатели маневренности варианта с 4 ВРК объясняются применением на данной модели неудачной понтонообразной формы обводов кормовой оконечности. Из рис. 2 также видно, что уровень маневренности модели *3pod* на заднем ходу находится на уровне маневренности во льдах ледоколов, оборудованных двумя ВРК. Модельные испытания показали также, что на ограниченной акватории, например в порту, при толщине набитого льда до 6 м возможно выполнение разворота «звездочкой» с использованием интенсивного размыва льда по бортам.

ОЦЕНКА ХОДКОСТИ В УСЛОВИЯХ СЖАТИЙ

Для расчетной оценки величины дополнительного ледового сопротивления при воздействии ледового сжатия на ходкость крупнотоннажных газовозов во льдах ис-

пользовалась следующая формула, основанная на подходах, изложенных А.Ассуром [Assur, 1975] и предложениях Г.Линдквиста.

$$R_{\text{лед.сж.}} = 2 \cdot f_d \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot h \cdot L_{\text{эцв}}, \text{ кН}, \quad (1)$$

где f_d – коэффициент динамического трения корпуса о лед; $\sigma_{\text{сж}}$ – нормальные напряжения в ледяном покрове при действии ледовых сжатий, кПа; h – толщина льда, м; $L_{\text{эцв}}$ – длина эквивалентной цилиндрической вставки судна (протяженность воздействия ледового сжатия на корпус судна), м.

Протяженность эквивалентной цилиндрической вставки $L_{\text{эцв}}$, подверженной влиянию ледового сжатия, рекомендуется определять как длину, на которой угол наклона ватерлинии к диаметральной плоскости (угол α) не превышает 5–6°. Таким образом, длина эквивалентной (расчетной) цилиндрической вставки оказывается больше длины собственно цилиндрической вставки $L_{\text{цв}}$ и позволяет более корректно учитывать влияние ледовых сжатий на корпус судна.

Эффективным способом снижения степени воздействия ледового сжатия на ледовую ходкость крупнотоннажных судов является движение судна задним ходом с использованием возможностей пропульсивного комплекса, состоящего из ВРК. Как было отмечено по опыту эксплуатации в Арктике ледокольно-транспортных судов типа «Норильский Никель», при движении этих судов задним ходом в условиях ледовых сжатий имеют место меньшие потери скорости за счет работы ВРК, омывающей борта судна и снижающей таким образом воздействие ледового сжатия на судно. Кроме того, еще со времени сдаточных ледовых испытаний первых ледоколов, оборудованных ВРК («Фенника» и «Нордика»), известен эффект расширения канала при развороте колонок в стороны. Однако при этом снижается скорость прокладки канала во льду из-за потери тяги в продольном направлении.

Использование в формуле (1) условной величины эквивалентной цилиндрической вставки судна (протяженности воздействия ледового сжатия на корпус судна) $L_{\text{эцв}}$, укороченной для режима заднего хода, позволяет учесть эффект снижения воздействия ледовых сжатий при работе ВРК на обмыв. Для этого случая предложено следующее выражение:

$$L_{\text{эцв}} = L_{\text{цв}} - v_s(B_K - B_s)/(2 \cdot v_p(s)), \text{ м}, \quad (2)$$

где B_K – ширина канала за судном на заднем ходу при отсутствии сжатия, B_s – ширина судна, $v_p(s)$ – скорость закрытия ледового канала в зависимости от степени сжатия льда s , v_s – скорость судна.

Скорость закрытия ледового канала может быть оценена по эмпирической формуле, приведенной в монографии [Сазонов, 2010]:

$$v_p(s) = 0,005 \cdot s + 0,03762 \cdot s^2, \text{ м/с}. \quad (3)$$

На рис. 3 приведена схема определения длины $L_{\text{эцв}}$ для режимов переднего (а) и заднего (б) хода.

Наличие эффекта снижения степени воздействия ледового сжатия при движении судна задним ходом было подтверждено по результатам испытаний в Гамбургском опытовом ледовом бассейне HSVA при моделировании ледовых сжатий. Испытывались две модели крупнотоннажного газовоза с тремя ВРК (обозначенные далее *3pod-1* и *3pod-2*), отличавшиеся формой обводов корпуса. Коэффициент динамического трения корпуса о лед для модели *3pod-1* составлял $f_d = 0,09$, для модели *3pod-2* $f_d = 0,1$. Сравнение экспериментальных данных с расчетными по

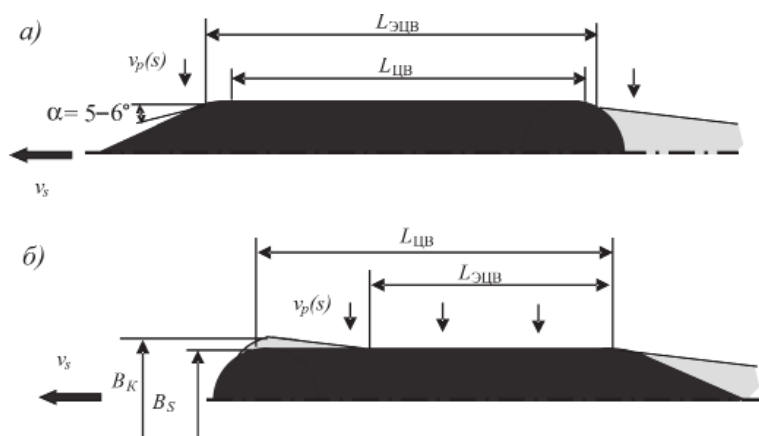


Рис. 3. Схема определения протяженности воздействия ледового сжатия (длины эквивалентной цилиндрической вставки) на корпус судна на режимах переднего (а) и заднего (б) хода.

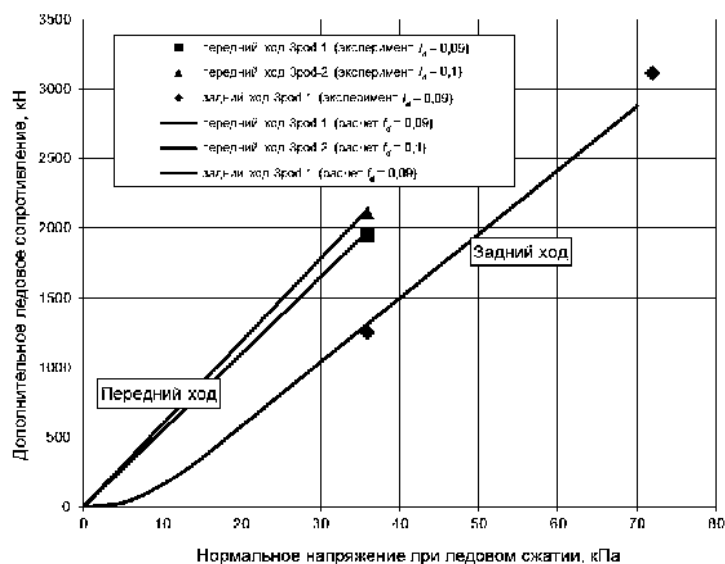


Рис. 4. Значения дополнительного ледового сопротивления от сжатия во льду толщиной 1,5 м при скорости 2 узла по результатам модельных испытаний в HSVa и расчетные значения по эмпирическим формулам (1–3).

формуле (1) для переднего хода и формулам (1) и (2) для режима заднего хода приведено на рис. 4.

Выполненные на основании изложенных расчетных формул и результатов модельных испытаний оценки ходкости крупнотоннажного газовоза, оборудованного тремя ВРК по 15 МВт, показывают возможность сохранения минимальной устойчивой скорости движения задним ходом во льду толщиной до 1,5 м торосистостью 1–2 балла при наличии ледовых сжатий силой 1–2 балла.

ВЫБОР ФОРМЫ ОБВОДОВ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ

В процессе отработки формы обводов корпуса и анализа результатов модельных испытаний различных вариантов газовоза для Ямала большое внимание уделялось выбору формы обводов носовой оконечности с точки зрения обеспечения оптимального баланса между ходкостью судна на чистой воде и во льдах.

Для газовоза с бульбообразной носовой оконечностью значительно увеличиваются эксплуатационные риски при работе во льдах. Газовоз с экстремальной ледокольной носовой оконечностью при плавании на чистой воде будет в значительной степени подвержен слеммингу на волнении. Оптимальным вариантом носовых обводов представляется применение умеренной ледокольной формы обводов, характеризующейся меньшими углами заострения ватерлиний и развала борта в носовой оконечности судна по сравнению с экстремальным ледокольным носом.

На рис. 5 проиллюстрированы преимущества применения умеренного ледокольного носа по сравнению с другими вариантами. Ледовая ходкость при движении задним ходом для всех вариантов показана применительно к варианту с тремя ВРК типа Azipod мощностью по 15 МВт с формой обводов кормы по предложению ЦНИИМФ. При толщинах льда до около 1 м (см. заштрихованную область) выигрыш в скорости обеспечивается при движении передним ходом, а при больших толщинах льда более эффективным является использование заднего хода. Как показали результаты испы-

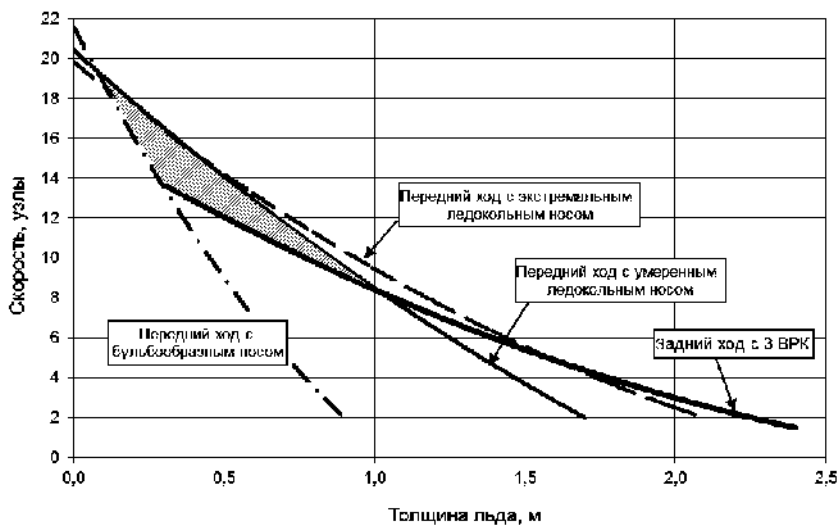


Рис. 5. График ледовой ходкости газовоза вместимостью около 170 тыс. м³ с пропульсивным комплексом из трех ВРК и тремя вариантами носовой оконечности.

таний на чистой воде в опытовых бассейнах VTT в Финляндии и HSWA в Хельсинки, умеренная ледокольная носовая оконечность обеспечивает приемлемые мореходные качества рассматриваемого крупнотоннажного арктического газовоза.

ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА

Применение на перспективных арктических крупнотоннажных судах винторулевых колонок в составе пропульсивного комплекса позволяет им эффективно использовать задний ход в тяжелых ледовых условиях, расширяя возможности самостоятельного плавания в арктических морях, а также обеспечить повышенную маневренность во льдах, сравнимую с маневренностью ледоколов, имеющих традиционные пропульсивные комплексы. Режим движения задним ходом, обеспечивающий обмыв корпуса и управляемость судна за счет работы ВРК, позволяет снизить степень воздействия сжатий на ледовое сопротивление, обеспечивая тем самым уменьшение вероятности застревания крупнотоннажного судна во льдах и приемлемые эксплуатационные скорости даже в тяжелых ледовых условиях. Очевидно, что при этом должны быть обеспечены необходимые прочностные характеристики как винторулевого комплекса, так и кормовой оконечности крупнотоннажных судов, предназначенных для работы во льдах задним ходом.

Реализация концепции самостоятельного плавания газовоза для Ямала полностью определяется возможностью создания и поставки ВРК Azipod мощностью 15 МВт категории Arc7, предназначенной для работы во льдах толщиной до 2 м, включая неограниченный задний ход в тяжелых льдах Карского моря и в пресноводных льдах Обской губы. Поэтому ЦНИИМФ в сотрудничестве с компанией АВВ (производитель ВРК Azipod) выполнил проработку основных проектных решений для обеспечения требований к эксплуатационной надежности и работоспособности такой ВРК. Аналогов подобной ВРК в части проектирования и эксплуатации нет. Существующие требования РС являются рамочными. ЦНИИМФ с учетом результатов натурных испытаний танкера «Тимофей Гуженко» проработал основные требования к обеспечению надежности основных элементов ВРК типа Azipod и работоспособности ГЭД. Разработаны требования к усилениям основных элементов в потоке силовых линий (гребной винт, вал, главный упорный подшипник). Для формирования требований к ВРК принимались решения, которые к настоящему времени полностью или частично проверены предшествующим опытом проектирования и эксплуатации, что снижает риски для такого инновационного пропульсивного комплекса. Например, диаметры гребных винтов приняты $D = 5,8\text{--}6,0$ м, что соответствует опыту проектирования и эксплуатации ледокола «Арктика». Для обеспечения работоспособности ВРК в тяжелых ледовых условиях коэффициент запаса ГЭД по моменту должен составлять не менее 1,7–1,8, что также апробировано и подтверждено натурным опытом эксплуатации ледоколов и судов активного ледового плавания в тяжелых ледовых условиях. Предлагаемые решения согласованы с компанией АВВ, которая подтвердила возможность поставки требуемой ВРК Azipod [Andryushin et al., 2013].

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СЦЕНАРИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ТИПОРАЗМЕРА АРКТИЧЕСКОГО ГАЗОВОЗА

Проведенные ЦНИИМФом исследования, базирующиеся на результатах модельных испытаний в опытовых ледовых бассейнах, анализе натурных испытаний современных ледокольно-транспортных судов и сравнительных технико-экономи-

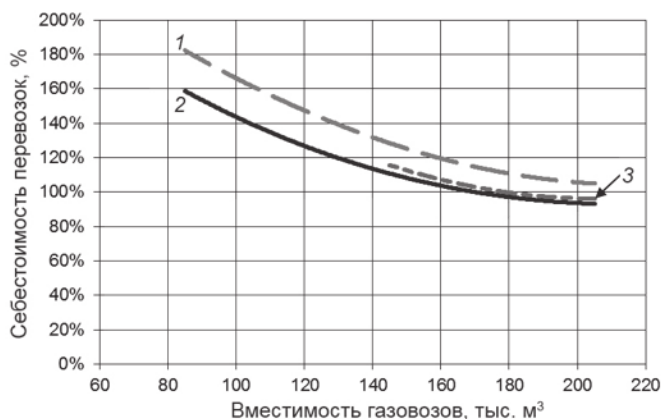


Рис. 6. Относительная себестоимость доставки СПГ на маршруте Ямал–Западная Европа в зависимости от вместимости газовоза и сценария его эксплуатации во льдах.

Варианты газовоза: 1 – с традиционным пропульсивным комплексом и ледокольным носом; 2 – с ВРК и ледокольным носом; 3 – с ВРК и бульбообразным носом. Сценарии эксплуатации в Карском море: 1 – с использованием ледокольной проводки; 2, 3 – самостоятельное плавание.

ческих расчетах, позволяют сделать вывод о том, что наиболее выгодными являются варианты транспортировки СПГ в арктическом регионе крупнотоннажными ледокольно-транспортными газовозами, обладающими широкими возможностями самостоятельной эксплуатации во льдах. Так, по результатам сравнительных технико-экономических расчетов, рациональным вариантом транспортной схемы доставки СПГ с п-ва Ямал (п. Сабетта) в Западную Европу является прямая транспортировка газа крупнотоннажными газовозами с проведением дноуглубительных работ в Обской губе [Цой и др., 2012].

При выполнении сопоставительных расчетов вместимость газовозов варьировалась от 80 до 205 тыс. м³. Как следует из результирующего графика на рис. 6, минимизация себестоимости доставки СПГ достигается при условии самостоятельного круглогодичного плавания газовоза в юго-западной части Карского моря, что определяет требуемую ледопроездимость газовоза не менее 2,3–2,4 м. Ледокольное обеспечение предусматривается только для обеспечения безопасной эксплуатации газовоза в припае Обской губы. Расчеты также показали, что использование применительно к арктическому газовозу концепции DAS с бульбообразной носовой оконечностью не дает преимуществ в части снижения себестоимости перевозок.

Основными факторами, предопределившими преимущество автономного плавания крупнотоннажных газовозов, являются:

- изначально высокая строительная стоимость судов-газовозов и достаточно большой уровень мощности, что приводит к тому, что необходимое ледовое усиление корпуса и повышение мощности для обеспечения потребной ледопроездимости дают относительно небольшое увеличение стоимости, которое в процентном соотношении значительно меньше по сравнению с судами других типов;
- использование в качестве топлива испаряющегося СПГ, перевозимого судном, что позволяет минимизировать данную статью эксплуатационных затрат, являющуюся определяющей при автономной работе судна во льдах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований по обоснованию основных параметров перспективных крупнотоннажных газовозов для Арктики показали, что перевозка СПГ крупнотоннажными газовозами активного ледового плавания является наиболее эффективным вариантом, при котором обеспечивается более низкая себестоимость круглогодичной доставки СПГ в Западную Европу по сравнению со среднетоннажными газовозами с привлечением ледокольного сопровождения в течение зимней навигации на всем ледовом участке плавания. Для обеспечения самостоятельного плавания в любых ледовых условиях юго-западной части Карского моря ледопроездимость газовоза должна быть не менее 2,3–2,4 м. Для обеспечения требуемой ледопроездимости, в том числе в условиях ледовых сжатий, и улучшения эксплуатационной маневренности во льдах предложена концепция газовоза вместимостью 170 тыс. м³ с умеренными носовыми ледокольными обводами и пропульсивным комплексом из трех ВРК Azipod мощностью по 15 МВт. Данная концепция предполагает движение в ледовых условиях как передним, так и задним ходом, а умеренные носовые обводы обеспечат приемлемые мореходные качества на чистой воде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Сазонов К.Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, 2010. 274 с.

Цой Л.Г., Андрюшин А.В., Штрек А.А., Шерстнёва И.В. Исследование оптимальных характеристик перспективного арктического газовоза для вывоза СПГ из п. Сабетта // Техническая эксплуатация морского флота: Сб. научн. трудов ЦНИИМФ. СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. С. 3–15.

Штрек А.А. Результаты транзитного рейса газовоза OB RIVER с грузом СПГ под проводкой атомных ледоколов по Северному морскому пути в ноябре 2012 г. // Материалы международной научно-практической конференции «80 лет с начала планомерного изучения и развития Севморпути» (тезисы докладов). М.: СОПС, 2013. С. 72–75.

Andryushin A., Hänninen S., Heidemann T. «Azipod» azimuth thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7 – ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions // 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC-2013). Espoo, Finland, June 9–13. 2013. P. 223–227.

Assur A. Problems in Ice Engineering // 3-rd International Symposium on Ice Problems. Hanover, NH, USA, August 1975. P. 361–373.

Wilkman G., Juurmaa K., Mattsson T., Laapio J., Fagerström B. Full-Scale Experience of Double Acting Tankers (DAT) MASTERA and TEMPERA // 17th International Symposium on Ice (IAHR-2004). Saint Petersburg, Russia, 21–25 June 2004. Vol. 1. P. 488–497.

L.G.TSOY, A.V.ANDRYUSHIN, A.A.SHTRUK

SUBSTANTIATION OF PRINCIPAL PARAMETERS OF PROSPECTIVE LARGE CAPACITY LNG CARRIERS FOR THE ARCTIC

To ensure the year round transportation of natural gas produced on the arctic shelf it is necessary to design special high ice class LNG carriers for active ice navigation which can provide for the efficient and safe transportation of LNG under heavy arctic sea ice conditions. The article deals with probable scenarios of the operation of LNG carriers in the Arctic using both the icebreaker support and

independent navigation in ice. The design of prospective arctic LNG carriers should be based on the up-to-date trends of the design and operation of icebreaking cargo ships of high ice classes. Consideration is given to the requirements of the ice propulsion and maneuverability in ice proceeding from the intended navigation scenario and area of operation. The methodology is given of the assessment of the impact of ice compression on the propulsion of large capacity LNG carriers in ice. Recommendations are provided on the choice of hull lines, power and type of the propulsion unit as applied to the year round operation of LNG carrier. On the basis of the analysis of the gained experience of operation of large capacity arctic tankers and the results of model tests and full scale trials, principal requirements to the design of propulsion systems of prospective arctic LNG carriers are given.

Keywords: LNG, arctic LNG carrier, maneuverability in ice, impact of ice compression, hull form, propulsion systems.

ОЦЕНКА ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ НЭС «АКАДЕМИК ТРЁШНИКОВ»

ст. науч. сотр. Н.А.КРУПИНА, канд. техн. наук В.А.ЛИХОМАНОВ,
науч. сотр. А.В.ЧЕРНОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: olks@aari.ru, likh@aari.ru, chernov@aari.ru

В декабре 2012 г. в свой первый рейс вышло новое научно-экспедиционное судно (НЭС) Росгидромета «Академик Трёшников». В статье описана методика проведения натурных ледовых испытаний судна и приведены результаты исследования ледовой ходкости НЭС «Академик Трёшников» в Антарктике. Испытания показали, что предельная ледопроеходимость НЭС «Академик Трёшников» при движении передним ходом не ниже заявленной в спецификации судна.

Ключевые слова: ледовая ходкость, ледопроеходимость, достижимая скорость, судно ледового плавания, ледовые испытания судна.

Для судна активного ледового плавания ледовая ходкость является одним из основных параметров, характеризующих эффективность его эксплуатации. Требования к способности судна работать в ледовых условиях определяются заказчиком на этапе составления технического задания на проектирование данного судна.

Ледовая ходкость – это возможность судна преодолевать ледяной покров определенной толщины с определенной скоростью, которая зависит от мощности главной энергетической установки. Основными характеристиками ледовой ходкости являются ледопроеходимость и кривая достижимых скоростей. Под ледопроеходимостью понимают предельную толщину сплошного ровного льда, которую может преодолеть судно, двигаясь с минимальной устойчивой скоростью (приблизительно 1,5–3 узла) при работе главной энергетической установки (ГЭУ) на полную мощность. Кривая достижимых скоростей – это график зависимости скорости движения судна от толщины преодолеваемого им льда при постоянном значении мощности ГЭУ. Для одного судна может быть построено несколько кривых достижимых скоростей в соответствии с разными уровнями мощности энергетической установки, в то время как значение предельной ледопроеходимости – это единственное значение для данного судна. Поэтому, когда речь заходит о сравнении ледовой ходкости нескольких судов, как правило, сравнивают именно предельную ледопроеходимость. Для НЭС «Академик Федоров» предельная ледопроеходимость при скорости 2 узла составляет 1 м. В техническом задании на проектирование НЭС «Академик Трёшников» требование к ледовой ходкости было сформулировано следующим образом: «ледопроеходимость НЭС при движении передним ходом со скоростью 2 узла в сплошном ровном льду при наличии 20 см снежного покрова и прочности льда на изгиб 500 кПа при осадке 8,5 м и мощностью на валах 90 % от максимальной (12,4 МВт) должна составлять 1,1 м».



Рис. 1. НЭС «Академик Трёшников» во время экспериментального рейса.

При проектировании и постройке нового судна ледового плавания обеспечение требуемой ледопроходимости выполняется в несколько этапов. На начальной стадии проектирования ледовая ходкость оценивается по теоретическим зависимостям. Далее теоретические результаты проверяются с помощью модельных испытаний в ледовом бассейне, и, в случае необходимости, вносятся коррективы в проект судна. Для подтверждения соответствия готового судна требованиям технического задания проводятся натурные ледовые испытания.

В процессе проектирования и строительства НЭС «Академик Трёшников» специалисты ФГБУ «ААНИИ» принимали активное участие, начиная с разработки технико-экономического обоснования строительства нового НЭС и заканчивая проведением натурных ледовых испытаний.

В настоящей статье речь пойдет об исследовании ледовой ходкости НЭС «Академик Трёшников» во время натурных ледовых испытаний в его первом антарктическом рейсе.

Внешний вид НЭС «Академик Трёшников» показан на рис. 1.

В табл. 1 приведены основные технические характеристики НЭС «Академик Трёшников».

Традиционная методика проведения натурных испытаний ледовой ходкости судов, сложившаяся еще в прошлом веке, согласно [Рывлин, Хейсин, 1980] заключается в следующем.

1. Специалисты-гидрологи выбирают для испытаний специальный полигон ровного сплошного льда (с возможным разбросом по толщине не более 10 %); обычно ледовый полигон имеет длину 1,5–2 мили.

2. Испытания в сплошном льду проводятся при прямолинейном движении судна на различных режимах движения. Задается режим работы пропульсивного комплекса при мощности $N_1 = const$, и замеряется скорость установившегося движения V_1 , затем задается $N_2 = const$ и фиксируется скорость V_2 , и так далее. Начальный участок движения судна по выбранному полигону (до момента, пока судно не зайдет в ледяное поле на расстояние не менее 1,5 длин корпуса) исключается из последующего анализа ледовой ходкости. После режимных пробегов (длина участка установившегося

Технические характеристики НЭС «Академик Трёшников»

Проект	Балтсудопроект
Постройка	ОАО «Адмиралтейские верфи»
Классификационное общество	Российский Морской регистр судоходства
Скорость на чистой воде, узлы	16,5
Вместимость, количество человек	
экипаж	60
научный состав	80
Длина наибольшая, м	133,6
Длина между перпендикулярами, м	123,2
Ширина, м	22,6
Высота борта, м	13,5
Осадка расчетная, м	8,5
Водоизмещение при осадке 8,5 м, т	16538,7
Дедвейт при осадке 8,5 м, т	6634,6
Главная энергетическая установка:	
тип	Дизель-электрическая, 2×9L38, 1×6L38
количество и мощность главных двигателей, кВт	2×6300, 1×4200
Пропульсивный комплекс:	
тип	ВФШ
количество гребных винтов	2
диаметр гребных винтов, мм	4000
количество и мощность гребных электродвигателей, кВт	2×7000

движения должна быть не менее длины корпуса, а лучше 2–3 длины корпуса) судно останавливается, и выполняются контрольные замеры толщины льда с дискретностью 30–50 м. В случае особо ответственных испытаний проводятся исследования физико-механических свойств льда на площади полигона. В зависимости от длины полигона и характеристик судна можно получить 2–4 режимных участка (с учетом участков разгона и торможения).

3. В процессе испытаний на судне измеряются необходимые параметры пропульсивного комплекса, и в результате получают зависимость мощности от скорости движения судна в сплошном льду толщиной h .

4. Для получения необходимых натурных данных в другой толщине льда производится поиск нового ледового полигона и испытания повторяются по изложенной выше схеме.

Натурные ледовые испытания НЭС «Академик Трёшников» в экспериментальном антарктическом рейсе выполнялись в море Беллинсгаузена и море Уэдделла и состояли из нескольких этапов:

08–10.02.2013 г. – выход со станции Беллинсгаузен и прибытие в район острова Аделейд в море Беллинсгаузена;

10–12.02.2013 г. – испытания судна на припае в районе острова Аделейд;

14–17.02.2013 г. – испытания судна в заливе Симонова;

25–26.02.2013 г. – выполнение экспериментов по исследованию ходкости судна на дрейфующем льду в море Уэдделла;

27.02.2013 г. – окончание программы натуральных ледовых испытаний и приход на станцию Беллинсгаузен.

Основной целью натуральных испытаний НЭС «Академик Трёшников» было определение достижимых скоростей судна при движении носом и кормой вперед. В данной статье обсуждается только первый режим.

Как уже говорилось выше, под достижимой скоростью понимается максимальная скорость, которую судно может развить при движении в данных ледовых условиях при заданной мощности на валу. В первую очередь для проектантов представляет интерес движение на максимальной длительной мощности гребного электродвигателя (ГЭД), и именно для данного режима выставляются спецификационные требования к судну. Для НЭС «Академик Трёшников» таким режимом является 90 % мощности ГЭУ.

Сложившийся подход к решению данной задачи состоит в нахождении достижимых скоростей движения судна в сплошном ровном льду как функции от толщины льда. Эту зависимость обычно принимают линейной [Рывлин, Хейсин, 1980]. В качестве одной точки задается скорость судна на чистой воде (толщина льда h равна нулю), а в качестве второй – значение предельной толщины льда h_{lim} , т.е. такой наибольшей толщины льда, при которой судно сохраняет минимальную устойчивую скорость движения, равную 1 м/с (2 узла).

Рассматриваемые натурные испытания НЭС «Академик Трёшников» выполнялись в припайных льдах Антарктики, характеризующихся наличием существенного снежного покрова. Существует несколько подходов учета влияния снега на показатели ледовой ходкости судов. На настоящий момент большинство специалистов согласно с тем, что степень влияния снега на ледовое сопротивление зависит от его плотности. Согласно методике ААНИИ при плотности снега свыше 350 кг/м^3 толщина снежного покрова принимается как добавочная толщина льда. На полигонах, на которых проходили испытания ходкости НЭС, наблюдался хорошо уплотненный ветром снежный покров толщиной до 100 см. Согласно выполненным измерениям, плотность этого покрова превышала 350 кг/м^3 . Для возможности совместного анализа всех полученных данных было принято решение считать толщину снежного покрова эквивалентной толщине льда.

Испытания при движении НЭС «Академик Трёшников» носом вперед в сплошных ровных льдах проводились в припае у острова Аделейд, в припае в заливе Си-монова и в поле дрейфующего льда в море Уэдделла.

В качестве примера на рис. 2 показан план полигона эксперимента в заливе Си-монова. В отличие от описанной выше методики проведения ледовых испытаний, в данном случае промеры толщины выполнялись не после пробега судна по полигону, а перед пробегом. Для этого испытательная партия высаживалась на лед и выполняла бурение ледяного покрова на всю его толщину с помощью механического бура, соответственно, толщина льда определялась с точностью до 5 см. Дополнительно в одной или двух точках отбирались керны для определения физико-механических свойств льда.

На ледопроеходимость судна основное влияние оказывает прочность льда при изгибе. Наиболее надежным способом оценить изгибающую прочность ледяного покрова является проведение испытаний консолей, выпиленных на всю толщину льда.



Рис. 2. План экспериментального полигона в заливе Симонова.

Такие испытания по техническим причинам могут проводиться при толщине льда не более 1 м и требуют больших временных затрат: на подготовку одной консоли в толстом льду уходит около 5 ч, а для набора статистики на каждом полигоне надо было бы испытывать не менее трех консолей. В то же время существуют общепризнанные аналитические зависимости, связывающие предел прочности льда при изгибе с температурой, соленостью и плотностью льда. В связи с вышесказанным полевые исследования физико-механических свойств на полигонах сводились к измерению профилей температуры, солености и плотности льда и снега, по которым в дальнейшем была рассчитана прочность льда при изгибе. Полученные значения хорошо согласуются с архивными данными по Тихоокеанскому сектору Антарктики. На рис. 3 показаны профили температуры, солености и плотности льда, полученные на одном из испытательных полигонов.

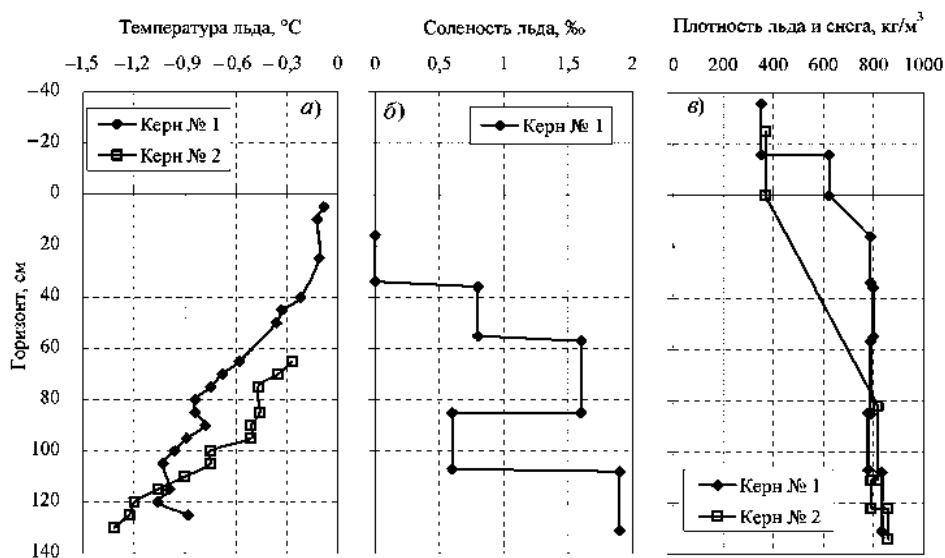


Рис. 3. Профили температуры (а), солености (б) и плотности (в) льда.

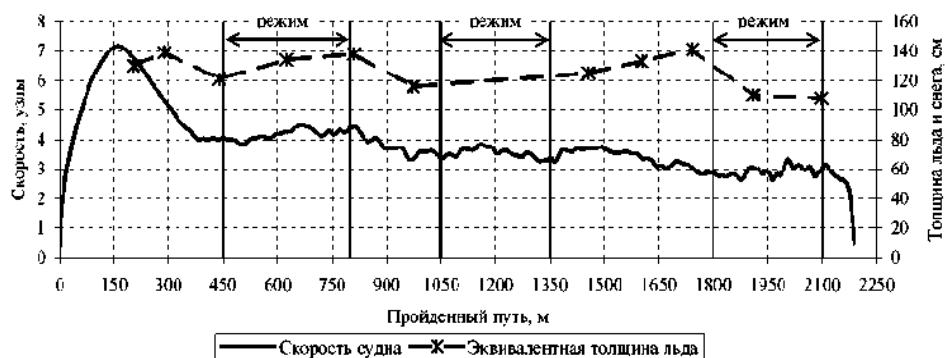


Рис. 4. Сопоставление скорости НЭС и толщины льда в одном из экспериментов.

На рис. 4 показан график изменения скорости судна и толщины льда при движении по полигону во время эксперимента в заливе Симонова. Согласно методике проведения ледовых испытаний на одном полигоне выполняются пробеги судна при разных уровнях мощности главной энергетической установки. В данном эксперименте мощность ГЭУ НЭС составляла 89 % на режиме 1, 77 % на режиме 2 и 63 % на режиме 3. Как видно из рис. 4, на каждом режиме протяженность установившегося движения НЭС составляла не менее 300 м (более двух корпусов судна). Средние значения параметров, характеризующих ледовую ходкость НЭС в этом эксперименте, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения параметров, характеризующих ледовую ходкость НЭС при движении носом вперед в ровном сплошном льду, по результатам эксперимента в заливе Симонова

№ режима	Скорость, узлы	Мощность ГЭД, МВт	Толщина льда, см	Толщина снега, см	Эквивалентная толщина льда, см
1	4,16	12,5	88	75	131
2	3,54	10,8	73	85	121
3	2,90	8,75	65	70	109

Аналогичные показанным в табл. 2 результаты были получены для экспериментов в припае острова Аделейд и море Уэдделла. В первую очередь рассматривались эксперименты, в которых уровень мощности ГЭУ был близок к максимальному. Экспериментальные точки показаны на рис. 5. С учетом того, что испытания проводились на разных полигонах и лед имел разную прочность, отличную от указанной в спецификации прочности льда при изгибе 500 кПа, было необходимо выполнить корректировку данных натурных измерений. В ААНИИ накоплен обширный банк данных натурных и лабораторных испытаний ледопроходимости ледоколов и судов ледового плавания в сплошном льду различной прочности на изгиб. На основании анализа указанных данных следует констатировать, что увеличение прочности льда на изгиб с 150 кПа до 500 кПа (как в эксперименте в заливе Симонова) на одинаковой скорости движения судна приведет к уменьшению толщины преодолеваемого льда на 23 %, а увеличение с 270 до 500 кПа, как в эксперименте в море Уэдделла, к

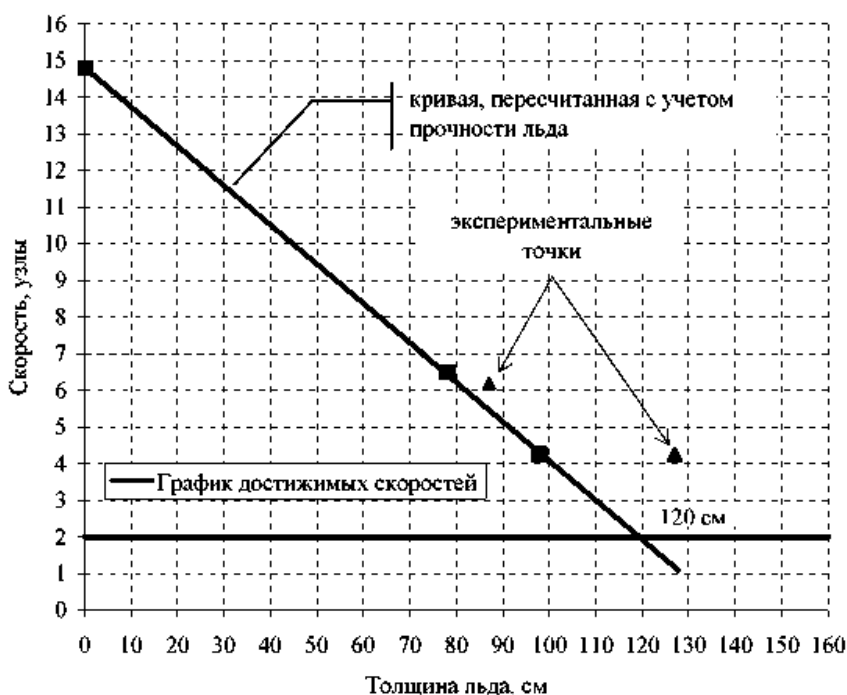


Рис. 5. График достижимых скоростей НЭС «Академик Трёшников» при движении носом вперед в сплошном ровном льду.

уменьшению толщины преодолеваемого льда на 9 % [Ионов, 1988]. Тогда в результате получим, что скорости движения НЭС 4,16 узла будет соответствовать скорректированная толщина сплошного льда 1,2 м, а скорости 6,2 узла – толщина 0,8 м.

В результате был получен график достижимых скоростей судна на мощности 12,4 МВт при движении в сплошном льду носом вперед с прочностью 500 кПа. С помощью данной кривой могут быть оценены спецификационные показатели НЭС. При построении этого графика были использованы данные ходовых натурных испытаний, в соответствии с которыми скорость НЭС на чистой воде при той же скорости вращения винтов, что и в ходе ледовых испытаний, составляет 14,9 узла. Результирующий график показан прямой линией на рис. 5.

По результатам ходовых ледовых натурных испытаний НЭС «Академик Трёшников» можно сделать вывод, что ледопроходимость НЭС при движении передним ходом со скоростью 2 узла в сплошном ровном льду и прочности льда на изгиб 500 кПа при осадке 8,5 м и мощностью на валах 90 % от максимальной (12,4 МВт) составляет 1,2 м. Соответственно, предельная ледопроходимость НЭС «Академик Трёшников» при движении передним ходом не ниже заявленной в спецификации судна.

Авторы статьи выражают благодарность за помощь и поддержку при проведении натурных ледовых испытаний капитану НЭС «Академик Трёшников» Лукьянову Сергею Владимировичу, капитану-наставнику Стецуну Игорю Юрьевичу, начальнику рейса Воеводину Андрею Васильевичу, ледовым наблюдателям – Дорофееву Александру Викторовичу и Смирнову Александру Анатольевичу, а также всему экипажу НЭС «Академик Трёшников» и специалистам сезона 58-й РАЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ионов Б.П. Ледовое сопротивление и его составляющие. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 80 с.
- Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2001. 512 с.
- Каистелян В.И., Фаддеев О.В. Исследование прочностных характеристик льда для обеспечения рационального проектирования судов ледового плавания // Судостроение за рубежом. 1982. № 2 (182). С. 27–39.
- Каистелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. Л.: Судостроение, 1968. 238 с.
- Каистелян В.И., Ильчук А.Н., Свистунов Б.Н. Эмпирические формулы для оценки ледопроеходимости ледоколов и судов ледового плавания в сплошных льдах // Теория, прочность и проектирование судов, плавающих во льдах. Нижний Новгород, 1995.
- Припай восточной Антарктиды // Труды САЭ. 1977. Т. 63. 132 с.
- Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980. 208 с.
- Сазонов К.Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. А.Н.Крылова, 2010. 274 с.

N.A.KRUPINA, V.A.LIKHOMANOV, A.V.CHERNOV

ESTIMATION OF ICE CAPABILITY OF RESEARCH VESSEL «AKADEMIK TRYOSHNIKOV»

In December 2012 a new research vessel (RV) RosHydroMet “Akademik Tryoshnikov” started her first voyage. The article describes a method for full-scale ice trials of the vessel and the results of the study of ice performance of “Akademik Tryoshnikov” in Antarctica. Tests have shown that the ice capability of “Akademik Tryoshnikov” when moving forward course, not lower than stated in the specifications of the vessel.

Keywords: ice capability, ice performance, attainable speed, ice going ship, full-scale ice trial of a vessel.

ОЦЕНКИ ИЗМЕНЧИВОСТИ СКОРОСТИ ДРЕЙФА АЙСБЕРГОВ И ГРАДИЕНТА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

д-р геогр. наук Г.К.ЗУБАКИН, науч. сотр. Н.Е.ИВАНОВ,
науч. сотр. А.В.НЕСТЕРОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: neivanov@aari.ru

Рассмотрен дрейф восьми айсбергов в северо-восточной части Баренцева моря с конца мая по август 2009 г. продолжительностью от 20 до 90 суток. Приведен алгоритм вычисления скорости дрейфа по GPS-измерениям географических координат и градиента атмосферного давления по данным реанализа NCEP. Изменчивость среднесуточных значений скорости дрейфа и пространственного градиента атмосферного давления в диапазонах синоптической и внутрисезонной изменчивости проанализирована векторно-алгебраическим методом в инвариантной форме на основе модели случайного евклидова вектора. Южнее Земли Франца-Иосифа средний дрейф направлен на запад и юго-запад, а у Новой Земли на северо-восток. Модуль среднего дрейфа составил 2–8 см/с при среднем значении скалярной скорости 5–10 см/с и при максимуме 20–35 см/с. Полное среднеквадратическое отклонение составило 8–16 см/с.

Ключевые слова: северо-восточная часть Баренцева моря, дрейф айсбергов, градиент атмосферного давления, евклидов вектор.

Задачей этой и предыдущей [Зубакин и др., 2013] статей является анализ дрейфа айсбергов в северо-восточной части Баренцева моря с конца мая по август 2009 г., статистическое описание изменчивости скорости дрейфа в диапазонах синоптической и внутрисезонной изменчивости и сопряженности дрейфа с полем атмосферного давления. Скорость дрейфа и градиент давления рассматриваются как случайные евклидовы векторы. В настоящей статье приведены морфометрические характеристики айсбергов, параметры траекторий дрейфа, алгоритм вычисления и значения скорости дрейфа и градиента атмосферного давления, методика статистического анализа и оценки параметров изменчивости скорости дрейфа и градиента давления.

ДАННЫЕ И ИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

Дрейф

Характеристики айсбергов, измерение координат

Объектом исследования является дрейф восьми айсбергов в северо-восточной части Баренцева моря к югу от Земли Франца-Иосифа (ЗФИ) и в районе северной оконечности Новой Земли в области, ограниченной широтами 77,5–80,0° с.ш. и долготами 45–65° в.д.; размеры района около 280 км с юга на север, около 160 км с запада на восток. Отобраны айсберги, по которым имеются данные не менее чем за 2–3 недели. Дрейф айсбергов продолжительностью от трех недель до трех месяцев прослежен с конца мая по август 2009 г. (см. рис. 1, табл. 1).

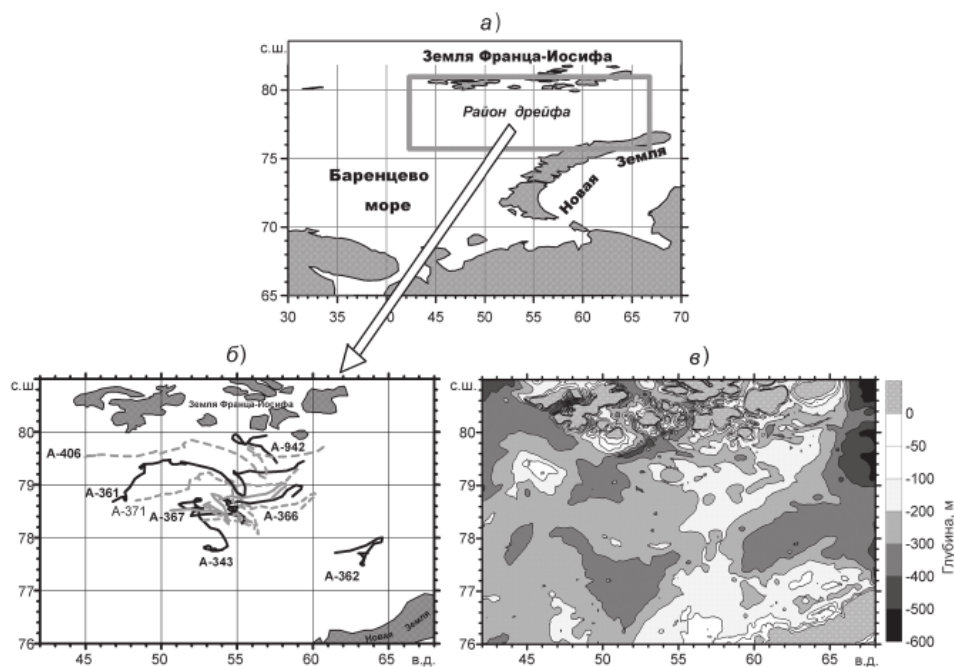


Рис. 1. Район (а), карты траекторий дрейфа айсбергов (б) и глубин (в) в мае–августе 2009 г.

Таблица 1

Период, продолжительность и район дрейфа айсбергов в мае–августе 2009 г.

№	Айсберг	Дата начала и окончания, продолжительность (N)			Крайние значения координат	
		Начало	Окончание	N, сутки	Долгота (в.д.)	Широта (с.ш.)
1	A-343	25/V	26/VIII	92	51,1 – 59,4	77,7 – 79,1
2	A-361	27/V	25/VII	57	46,1 – 60,0	78,6 – 79,5
3	A-362	22/V	12/VI	20	61,0 – 64,5	77,4 – 78,0
4	A-366	24/V	3/VIII	69	51,0 – 60,0	78,1 – 79,0
5	A-367	24/V	9/VII	45	52,0 – 59,9	78,1 – 79,0
6	A-371	27/V	9/VII	41	48,3 – 59,2	78,5 – 79,4
7	A-406	29/V	12/VII	42	44,9 – 61,3	79,1 – 79,9
8	A-942	11/VII	8/VIII	26	54,6 – 57,7	79,3 – 80,0

Источником данных по дрейфу являются GPS-определения широты и долготы. Они выполнены методом вертолетной постановки (десантирование) дрейфующих буев на монолитный участок айсберга. Буй изготовлен на основе терминала системы Argos MAR GE V2/A с дискретностью позиционирования, обеспечивающей точность определения местоположения ± 10 м (в зависимости от количества задействованных каналов). Периодичность передачи координат – 15 мин. Эти работы выполнены сотрудниками лаборатории «АРКТИК-ШЕЛЬФ» ААНИИ.

В табл. 2 приведены параметры траекторий дрейфа (рис. 1б) – величина результирующего перемещения R , длина траектории L и коэффициент извилистости $\gamma_L = L/R$.

Таблица 2

Параметры траекторий айсбергов – длина траектории L (км), модуль результирующего перемещения R (км) и коэффициент извилистости γ_L по всему дрейфу (a) и за 10 суток (b)

Параметр траектории		Айсберг							
		343	361	362	366	367	371	406	942
R	a	153,8	278,7	50,7	153,0	149,2	216,6	293,9	58,4
	b	1,7	5,1	2,5	2,2	3,3	5,3	7,0	2,3
L	a	689,1	504,3	209,4	563,0	429,6	419,6	535,2	156,3
	b	7,5	8,8	10,5	8,2	9,5	10,2	12,7	6,0
γ_L		4,5	1,8	4,1	3,7	2,9	1,9	1,8	2,7

Они определены для всей траектории каждого из айсбергов и, учитывая различную продолжительность дрейфа, в пересчете на 10 суток.

Согласно табл. 2 параметры траектории изменяются в широких пределах: $R = 60\text{--}300$ км, $L = 150\text{--}700$ км, $\gamma_L = 1,8\text{--}4,5$. Отметим, что продолжительность дрейфа А-406 вдвое меньше, чем А-343, а результирующее перемещение, наоборот, вдвое больше. Эта особенность траектории А-406 особенно хорошо заметна по значениям параметров, приведенным к 10 суткам, – по R и L она является наибольшей (7,0 и 12,7 км за 10 суток) при минимальной извилистости.

Морфометрические параметры айсбергов приведены в табл. 3. Они составили: длина 50–440 м, ширина 45–235 м, высота надводной части 9,7–16,4 м, глубина подводной части 46–82 м, масса от 0,15 до 3,7 млн т. Семь айсбергов заморожены в ледяные поля сплоченностью 8–9 баллов, айсберг А-942 (начало измерений в июле) в окружении крупнобитого льда. Безразмерный удельный размах $\tilde{R} = (\max - \min) / m$ позволяет сопоставить разноименные параметры, он составляет около 0,5 для H^+ и H^- , около 1,5 для L и B , около 2,5 для M . Анализ траекторий по 15-минутным наблюдениям показал для всех айсбергов отсутствие механического контакта с дном (карта глубин приведена на рис. 1в).

Таблица 3

Параметры айсбергов на момент начала наблюдений

№	Айсберг	L	B	H^+	H^-	S	Q	M	F
1	А-343	436	234	9,7	51	712,0	4,11	3703	I
2	А-361	366	106	14,9	82	326,3	3,01	2715	I
3	А-362	172	82	15,9	60	100,6	0,64	578	I
4	А-366	270	156	11,3	70	284,3	0,21	1914	I
5	А-367	210	80	12,6	59	95,1	0,64	577	II
6	А-371	108	44	16,4	46	34,0	0,18	160	III
7	А-406	80	55	10,4	50	34,3	0,17	154	III
8	А-942	225	89	12,6	74	131,0	1,10	911	I
$\tilde{R}$		1,5	1,8	0,51	0,64	3,2	3,0	2,6	–

Примечания: L – длина (м), B – ширина (м), H^+ – высота (м), H^- – осадка (м), S – площадь ($\text{м}^2 \cdot 10^2$), Q – объем ($\text{м}^3 \cdot 10^6$), M – масса ($\text{кг} \cdot 10^6$), F – форма (I – столовый, II – наклонный, III – пирамидальный) и удельный размах $\tilde{R}$ параметров по восьми айсбергам.

Вычисление и сглаживание скорости дрейфа

Скорость дрейфа вычислена по измерениям широты и долготы. В качестве модели фигуры Земли принят эллипсоид вращения с параметрами: длина экватора 40075,7 км, длина меридиана 40008,6 км, длина дуги меридиана в 1° в рассматриваемых широтах 111,6 км. Для анализа генерального дрейфа координаты взяты через 1 час, что позволяет подавить помехи, связанные с ошибками измерения координат, высокочастотным шумом и вращением айсберга. Для исключения приливных эффектов использовано скользящее осреднение на периоде 13 ч. Для скорости дрейфа $\vec{V}$, см/с принято направление «куда» (из компаса).

Поле атмосферного давления и его пространственного градиента

Ветер – одна из основных причин дрейфа, но на айсбергах нет измерений ветра. Поэтому использован градиент поля атмосферного давления (далее градиент). Пространственным градиентом $\vec{\nabla}P$ скалярного поля $P(\vec{r})$ (где $\vec{r}$ – вектор пространственных координат) является евклидов вектор $\vec{\nabla}P \equiv dP/d\vec{r}$ с модулем ∇P , направлением $\varphi_{\vec{\nabla}P}$ (в направлении максимального увеличения P) и проекциями $(\nabla P_x = \partial P / \partial x, \nabla P_y = \partial P / \partial y)$. Размерность ∇P – гПа/100 км.

По теории изобарического дрейфа [Зубов, 1945] дрейф идет вдоль изобар, оставляя область высокого давления справа, модули его скорости и градиента пропорциональны. Анализ многочисленных данных [Гудкович, Доронин, 2001] показал, что дрейф отклоняется от изобары. В Арктическом бассейне средний угол отклонения летом $10\text{--}20^\circ$ (рис. 2а).

Наиболее надежным источником регулярных во времени и в пространстве данных по давлению является реанализ. Сопоставление данных измерений на сети ГМС

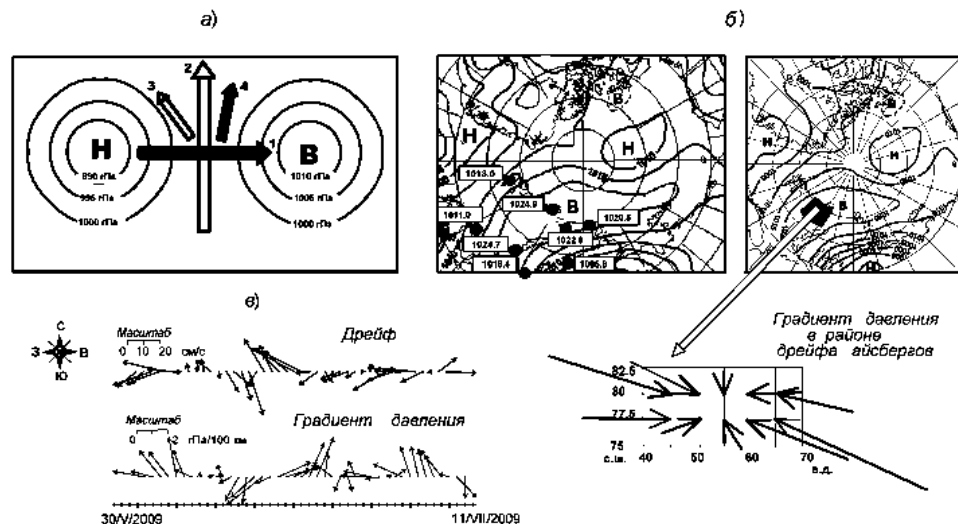


Рис. 2. Поле атмосферного давления и дрейф: а – схема изобарического дрейфа в системе циклон (Н) – антициклон (В). Стрелками показаны направления градиента давления (1), геострофического ветра (2), приповерхностного ветра (3), дрейфа (4); б – поля атмосферного давления на уровне моря по данным измерений 5 мая 2009 г. (слева, цифры в прямоугольниках – давления на восьми ГМС), реанализа NCEP (справа) и карта градиента давления (ниже); в – временные ряды среднесуточной скорости дрейфа айсберга А-406 и градиента давления.

и реанализа NCEP с пространственным шагом $2,5^\circ$ по широте и по долготе [Kalnay et al, 1996; URL: <http://wdc.aari...>, <http://www.aari>] для ряда типичных ситуаций показало хорошее взаимное соответствие этих полей в рассматриваемом районе. Один из примеров приведен на рис. 2б. На этом же рисунке внизу показано векторное поле градиента давления в районе дрейфа. Несмотря на то, что размеры района многократно меньше характерных масштабов барических образований, в поле градиента присутствует сильная пространственная неоднородность (поскольку градиент определен по разностям давления в смежных узлах сетки). Поэтому значения $\vec{\nabla}P$ необходимо интерполировать в точку положения айсберга на каждый момент времени. Для взаимного согласования значения $\vec{V}$ и $\vec{\nabla}P$ усреднены за сутки. Временные ряды среднесуточных значений $\vec{\nabla}P$ и $\vec{V}$ для А-406 на рис. 2в демонстрируют четкую реакцию $\vec{\nabla}P$ на изменения $\vec{V}$.

Методика статистического анализа изменчивости скорости дрейфа и градиента

Дрейф, морские течения и ветер есть направленный перенос массы, поэтому за математическую модель скорости дрейфа принят плоский евклидов вектор $\vec{V}(V_x, V_y)$ с модулем V , направлением φ и декартовыми проекциями V_x, V_y , для которого определены сложение по правилу параллелограмма, преобразование координат при их вращении и три вида умножения – скалярное, векторное и тензорное [Кочин, 1961].

Статистический анализ изменчивости скорости дрейфа и градиента выполнен векторно-алгебраическим методом [Белышев и др., 1983]. Исчерпывающей характеристикой вектора как случайной величины является двумерное распределение вероятностей, определенное как вероятность попадания в заданную градацию модуля и направления $f(V, \varphi) = P(V_1 \leq V < V_2, \varphi_1 \leq \varphi < \varphi_2)$, и одномерные распределения $f(V)$ и $f(\varphi)$.

Для сжатия информации использован метод моментов. Математическое ожидание – вектор $\vec{m}_V$. Дисперсия – тензор второго ранга, определенный как математическое ожидание тензорного произведения централизованных векторов

$$D_{\vec{V}} = M \{ (\vec{V} - \vec{m}_V) \otimes (\vec{V} - \vec{m}_V) \} = \begin{pmatrix} D_{V_x} & K_{V_x V_y} \\ K_{V_x V_y} & D_{V_y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Элементами тензора (1) являются дисперсии D , и ковариации K , соответствующих проекций. Для приведения симметричного тензора $D_{\vec{V}}$ к диагональному виду исходная система координат развернута на угол α , соответствующий направлению максимальной изменчивости $\vec{V}$

$$\alpha = 0,5 \arctg \frac{2K_{V_x V_y}}{D_{V_x} - D_{V_y}} \pm 180^\circ. \quad (2)$$

Тензор (1) – единый математический объект, совокупность его кинематических свойств раскрывается через инварианты – скалярные числа, не связанные с ориентацией системы координат. Именно здесь проявляется принципиальное отличие векторно-алгебраического метода от покомпонентного, в котором моделью вектора скорости является система двух скалярных величин (V_x, V_y) . В нем дисперсия представлена матрицей, которая совпадает с (1) только по форме. Каждый элемент этой матрицы рассматривается отдельно, то есть искусственно разрывается связь внутри единого объекта – вектора [Белышев и др., 1983].

Основные инварианты симметричного тензора (1) характеризуют распределение дисперсии по ортогональным направлениям $\lambda_{1,2} = 0,5 \left\{ I_1 \pm \sqrt{(D_{Vx} - D_{Vy})^2 + 2K_{VxVy}^2} \right\}$. Они определяются всеми четырьмя компонентами тензора $D_{\vec{v}}$, то есть учитывают совокупный эффект изменения модуля и направления. Комбинации этих инвариантов – также инварианты. Линейный инвариант характеризует модуль полной дисперсии (за счет модуля и направления) $I_1 = \lambda_1 + \lambda_2$. Отношение линейного инварианта к модулю средней скорости $v = \sqrt{I_1} / m_{\vec{v}}$ – векторный аналог коэффициента вариации, при $v < 1$ процесс устойчивый и наоборот. Далее $\sqrt{I_1}$ используется без символа радикала.

Следуя методике статистического анализа дрейфа [Зубакин и др., 1978, 1987; Гудкович, Доронин, 2001], дополнительно использованы характеристики скалярного модуля скорости дрейфа V – среднее значение $\bar{V}$, стандартное отклонение σ_V и максимум $V_{\max}$. Соотношения I_1 и дисперсии модуля скорости $\gamma_d = D_V / I_1$, $1 - \gamma_d$ характеризуют вклады изменений модуля и направления вектора скорости в полную дисперсию.

Тензор $\sigma_{\vec{v}} = \sqrt{D_{\vec{v}}} = \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} \end{pmatrix}$ (среднеквадратического отклонения скорости (СКО)) можно представить эллипсом с полуосями $\lambda_{1,2}$, ориентированным в направлении максимальной изменчивости α (2). Вытянутость эллипса описывает инвариант $\chi = \lambda_2 / \lambda_1$.

Ковариацию в системе двух случайных векторов описывает несимметричный тензор

$$Cov_{\vec{v}\vec{v}_P} = \begin{pmatrix} K_{V_x \nabla P_x} & K_{V_y \nabla P_y} \\ K_{V_x \nabla P_y} & D_{V_y \nabla P_y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} + 0,5G \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В отличие от тензора (1) линейный инвариант I_1 симметричной части тензора (3) характеризует интенсивность взаимных изменений коллинеарных составляющих векторов $\vec{V}$ и $\vec{V}_P$, а инвариант G кососимметричной части (3), названный индикатором вращения, характеризует интенсивность взаимных изменений ортогональных составляющих.

Временной ряд скорости дрейфа $\vec{V}$ описывает тензор спектральной плотности $S_{\vec{v}}(\omega)$. Линейный инвариант $I_1(\omega) = \lambda_1(\omega) + \lambda_2(\omega)$ характеризует интенсивность полной (по модулю и направлению) изменчивости, а знак квадратичного инварианта показывает преобладание вращения по часовой или против часовой стрелки. Необходимым и достаточным условием отсутствия вращения является $\lambda_2(\omega) = 0$, $I_1(\omega) = \lambda_1(\omega)$.

Эти оценки уже использовались нами для анализа дрейфа льда в Северном Ледовитом океане, течений и ветра [Иванов, 2004; Иванов и др., 2011; Volkov et al., 2012].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценки параметров изменчивости по полным траекториям дрейфа

Двумерное и одномерные распределения вероятности $\vec{V}$ и $\vec{V}_P$ приведены в табл. 4 и на графиках рис. 3а на примере А-406 с наибольшим результирующим перемещением (табл. 2). Оценки распределений и спектров получены по сглаженным одночасовым значениям $\vec{V}$ и мгновенным (через 6 ч) значениям $\vec{V}_P$, а оценки моментов – по среднесуточным значениям. На рис. 3б распределение представлено

Таблица 4

**Двумерная и одномерные повторяемости (%) ежечасных скоростей дрейфа айсберга
А-406 и градиента давления по модулю и направлению,
средний и максимальный модуль на румбе**

Румбы	Градации модуля скорости дрейфа, см/с								$f(\varphi)$	$V_{\text{ср}},$ см/с	$V_{\text{max}},$ см/с
	0– 5	5– 10	10– 15	15– 20	20– 25	25– 30	30– 40	>40			
С	4,1	3,6	1,0	0,1	0,1	0,4	0,4	–	9,5	8,0	33,5
СВ	1,4	1,4	0,2	0,3	0,5	–	–	–	3,8	9,5	24,9
В	0,1	0,6	0,2	1,2	1,5	–	–	–	3,6	17,9	24,3
ЮВ	0,6	0,8	3,1	2,2	–	–	–	–	6,6	12,8	19,0
Ю	1,3	2,5	0,9	1,9	1,1	2,1	0,8	–	10,5	16,3	31,1
ЮЗ	1,0	3,0	5,6	3,8	2,3	0,8	0,3	–	16,7	14,7	32,5
З	0,7	4,6	5,3	8,2	4,5	2,2	3,1	0,8	29,2	18,5	41,5
СЗ	1,9	3,1	2,3	5,6	3,0	1,3	2,9	0,2	20,1	18,0	40,5
$f(V)$	11,0	19,4	18,4	23,1	12,9	6,7	7,4	1,0	100	–	–

Румбы	Градации модуля градиента давления, гПа/100 км								$f(\varphi)$	$V_{\text{ср}},$ гПа/100 км	$V_{\text{max}},$ гПа/100 км
	0,0– 0,5	0,5– 1,0	1,0– 1,5	1,5– 2,0	2,0– 2,5	2,5– 3,0	3,0– 4,0	>4			
С	2,4	0,3	2,4	7,1	9,5	1,2	2,4	–	24,9	1,94	3,76
СВ	2,4	0,7	7,1	4,7	0,7	0,1	–	–	14,2	1,31	1,92
В	0,3	2,4	2,4	0,8	0,6	0,2	2,4	0,1	7,1	1,65	3,19
ЮВ	0,1	0,2	0,6	4,7	0,4	–	–	–	4,7	1,78	1,98
Ю	0,1	0,6	2,4	2,4	0,1	–	–	–	5,3	1,43	1,90
ЮЗ	0,2	0,5	4,7	0,8	0,3	1,4	2,4	0,2	9,5	2,26	3,17
З	2,4	2,4	2,4	7,1	2,4	0,3	–	–	16,6	1,41	2,17
СЗ	0,2	0,5	2,4	9,3	0,6	5,3	–	–	17,8	1,99	2,79
$f(V)$	7,1	5,3	23,7	35,5	12,4	8,9	7,1	0,3	100	–	–

Примечание: жирным шрифтом выделена основная мода двумерного распределения.

розами повторяемости, в них ширина прямоугольников на лучах обозначает соответствующую градацию модуля, а их длина – повторяемость. Для градиента в таблицах и графиках рис. 3а использовано направление $\varphi_{\nabla P}$, а розы повторяемости, векторы $\vec{m}_{\nabla P}$ и эллипсы $\sigma_{\nabla P}$ ориентированы по геострофическому ветру.

Согласно табл. 4 и рис. 3а у А-406 распределения вероятностей $\vec{V}$ и $\vec{\nabla P}$ одно-модальные и взаимоподобные (вплоть до конфигурации изолиний). Отметим также близкие модальные значения $f(V, \varphi)$ – 8,2 % у дрейфа и 9,5 % у градиента давления. Главная мода $\vec{V}$ отмечается для дрейфа, направленного на запад со скоростью 15–20 см/с. Главная мода $\vec{\nabla P}$ отмечается для градиента, направленного на север с модулем 2,0–2,5 гПа/100 км. Это соответствует небольшому углу отклонения дрейфа от геострофического ветра. Единственное видимое различие состоит в том, что повторяемость по модулю $f(V)$ у градиента является более сосредоточенной, а у дрейфа повышена повторяемость в более широком диапазоне модулей скорости 5–15 см/с. В распределении по румбам средних модулей V и ∇P четких закономерностей нет. Розы повторяемости также демонстрируют согласованность распределений $\vec{V}$ и $\vec{\nabla P}$.

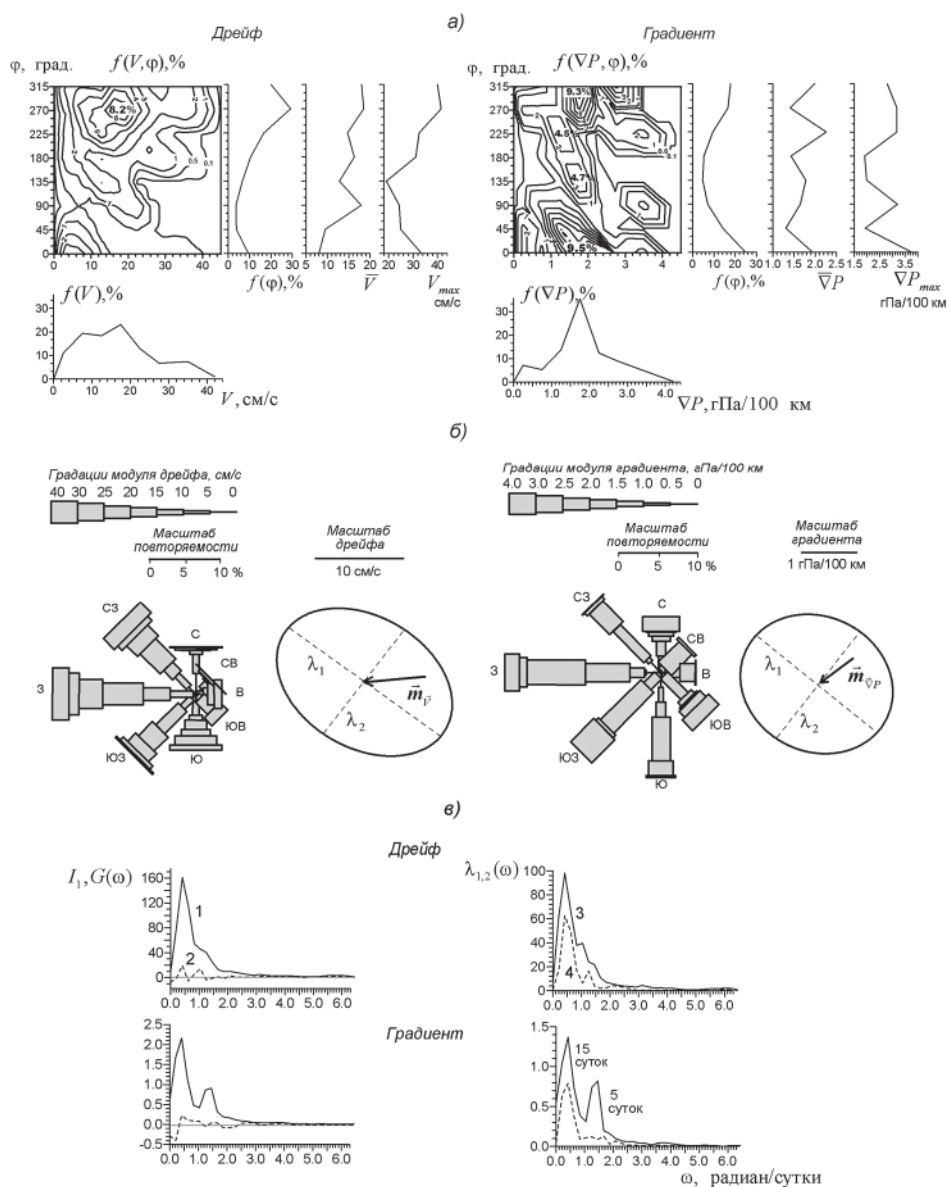


Рис. 3. Вероятностные характеристики скорости дрейфа айсберга А-406 и градиента давления: а – графики двумерной, одномерных повторяемостей и распределение средних и максимальных модулей по румбам; б – розы двумерной повторяемостей, совмещенные векторы средней скорости и эллипсы СКО (для градиента роза, вектор и эллипс развернуты в направлении геострофического ветра); в – инварианты тензора спектральной плотности (I – линейный, 2 – индикатор вращения, 3, 4 – полуоси эллипса, цифры – период колебаний в сутках).

Тензор спектральной плотности $S_{\vec{v}}(\omega)$ на рис. 3в представлен графиками инвариантов, цифрами обозначены периоды колебаний в сутках. Спектры $\vec{V}$ и $\vec{\nabla P}$ качественно идентичны и типичны для синоптической изменчивости в высоких и

умеренных широтах. Графики $I_1(\omega)$ показывают общее ослабление изменчивости с ростом ω для колебаний с периодами более 3 сут., на фоне которого выделяются энергонесущие зоны на периодах около 15 и 5 сут. Графики $G(\omega)$ указывают на отсутствие преобладания однонаправленного изменения направления во всей частотной области. Графики $\lambda_{1,2}(\omega)$ показывают неравномерное распределение дисперсии по направлениям в области колебаний с периодами более 3–4 сут. и близкое к равномерному распределение в высокочастотной области.

На рис. 3б рядом с розами повторяемости показаны совмещенные векторы математического ожидания и эллипсы СКО. Числовые значения этих и других параметров изменчивости приведены в соответствующих А-406 строках в табл. 5. Средняя скорость дрейфа отклоняется от среднего градиента на 57° влево (т.е. на 33° вправо от геострофического ветра). Направление среднего вектора ϕ и ориентации эллипса СКО α различаются у дрейфа на 35° , у градиента на 64° . Вклад в дисперсию изменений направления $1 - \gamma_d$ относительно велик и у дрейфа больше, чем у градиента, – 0,82 против 0,69. Оба процесса неустойчивые, коэффициент изменчивости составляет $V_{\bar{V}} \cong 2,5$, $v_{\bar{V}P} \cong 3,5$. Распределение дисперсии по направлениям (вытянутость эллипса) у $\bar{V}P$ почти изотропное – 0,86, а у $\bar{V}$ анизотропное – 0,70.

Таблица 5

**Характеристики изменчивости градиента давления (а), (гПа/100 км)
и скорости дрейфа (б), (см/с)**

Айсберг		Модуль			Средний вектор		СКО					$1 - \gamma_d$	v
		$\bar{V}$	σ	max	m	ϕ	I_1	λ_1	λ_2	χ	α		
343	а	1,31	0,74	3,24	0,21	327	1,49	1,11	1,00	0,89	56	0,75	7,1
	б	8,7	6,0	25,8	1,8	221	10,5	8,1	6,6	0,81	276	0,67	5,8
361	а	1,50	0,76	3,24	0,61	327	1,58	1,20	1,02	0,84	31	0,77	2,6
	б	10,3	7,3	30,4	5,8	251	11,3	9,0	6,9	0,76	304	0,58	1,9
362	а	1,60	0,73	2,84	0,56	305	1,70	1,42	0,94	0,66	310	0,82	3,0
	б	13,4	9,4	31,5	3,8	92	16,2	14,1	7,9	0,56	52	0,66	4,3
366	а	1,40	0,79	3,24	0,29	345	1,58	1,14	1,09	0,96	40	0,75	5,4
	б	9,6	7,2	30,9	2,4	263	11,8	8,7	7,9	0,91	275	0,63	4,9
367	а	1,61	0,82	3,24	0,45	337	1,76	1,34	1,15	0,86	235	0,78	3,9
	б	11,4	7,0	27,1	3,7	262	12,9	9,8	8,4	0,86	288	0,71	3,5
371	а	1,68	0,77	3,24	0,71	325	1,73	1,37	1,05	0,76	43	0,80	2,4
	б	12,5	7,45	31,3	6,7	252	13,0	10,0	8,3	0,83	330	0,67	1,9
406	а	1,69	0,74	3,20	0,67	323	1,73	1,31	1,13	0,86	26	0,82	2,6
	б	15,1	8,5	34,2	8,1	265	15,4	12,6	8,8	0,70	300	0,69	1,9
942	а	1,07	0,51	2,08	0,32	283	1,16	1,00	0,58	0,58	228	0,81	3,6
	б	7,2	4,8	20,8	2,8	170	8,4	7,3	4,0	0,55	133	0,67	3,0

Для всех восьми айсбергов параметры изменчивости приведены в табл. 5, розы повторяемости, совмещенные векторы средней скорости и эллипсы СКО приведены на рис. 4. Они демонстрируют значительную вариабельность параметров изменчивости. Средняя скалярная скорость суммарного дрейфа $\bar{V}$ изменялась от 7 до 15 см/с, максимальная скорость от 20 до 35 см/с, модуль вектора математического ожидания

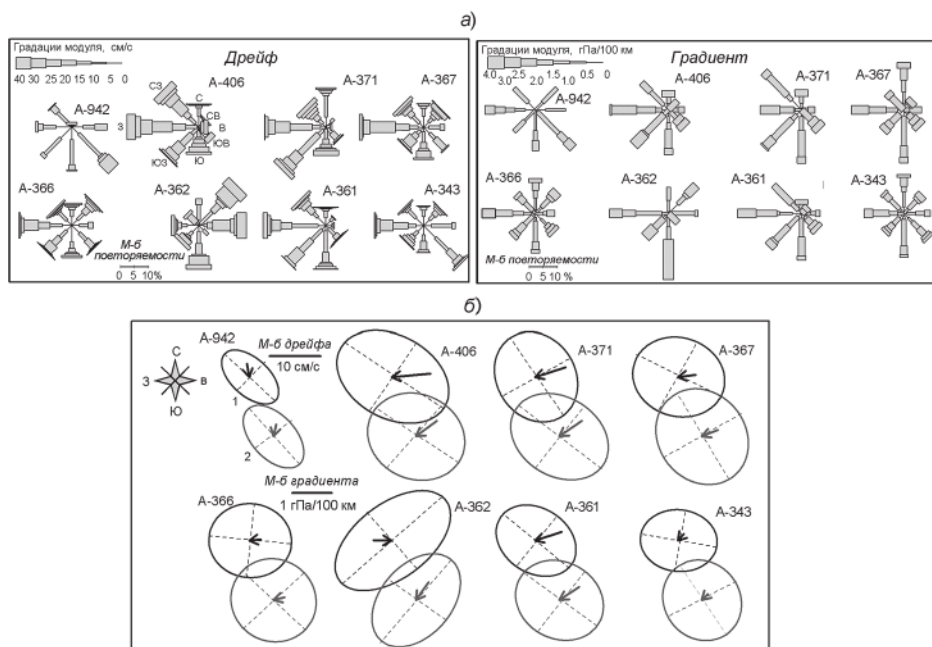


Рис. 4. Розы двумерной повторяемости (а) и совмещенные векторы средней скорости и эллипсы СКО (б) дрейфа восьми айсбергов (1) и градиента давления (2, развернуты в направлении геострофического ветра).

$\bar{m}_{\vec{v}}$ от 2 до 8 см/с. Генеральное направление дрейфа у семи айсбергов к 3-ЮЗ, у айсберга А-362 – к В, тогда как средний градиент у всех восьми айсбергов (включая А-362) ориентирован на ЮЗ. Модуль СКО (инвариант I_1) изменялся от 8,5 до 16 см/с, вытянутость эллипсов СКО – от 0,55 до 0,85 у дрейфа и от 0,6 до 0,95 у градиента, относительная дисперсия направления $1 - \gamma_d$ является единственным стабильным параметром (дрейф 0,58–0,76, градиент 0,75–0,82) и у дрейфа меньше, чем у градиента, для всех айсбергов. Коэффициент изменчивости v всегда больше 1, при этом у семи айсбергов $v_{\vec{v}} - v_{\vec{v}_P}$, а у айсберга А-362 с противоположными направлениями средних векторов дрейфа и градиента соотношение обратное.

На рис. 4 особое внимание обратим на взаимную согласованность характеристик изменчивости дрейфа и градиента при том, что количественные значения параметров для различных айсбергов существенно неодинаковые. Особенно наглядно это взаимное соответствие прослеживается на рис. 4б по величине и по направлению векторов математического ожидания (кроме А-362) и по размерам, форме и ориентации эллипсов СКО.

Вместе с тем ряд особенностей косвенно указывает на роль неветрового компонента суммарного дрейфа. В связи с этим важны указанные различия направления средних векторов дрейфа и градиента у А-362 и увеличенная относительная дисперсия направления у градиента сравнительно с дрейфом. Согласно имеющимся представлениям [Гудкович, Доронин, 2001], скорость неветрового дрейфа является квазипостоянной (по крайней мере по направлению) на промежутках времени от нескольких недель до сезона. Поэтому коэффициенты вариации дрейфа и градиента позволяют судить о соотношении направлений ветровой и неветровой составляющих дрейфа

еще до их количественной оценки. В рамках этой гипотезы при противоположном направлении этих составляющих должно выполняться неравенство $V_{\vec{r}} > V_{\vec{v}_P}$ (это айсберг А-362) и наоборот (это остальные айсберги). Поэтому можно предполагать, что неветровая составляющая дрейфа А-362 имеет составляющую, направленную к востоку, а у остальных семи айсбергов – к западу.

Сопоставление масштабов временной изменчивости и пространственных различий

Полученные оценки определены для перемещающихся объектов и являются характеристиками пространственно-временной изменчивости. Наличие синхронных данных по нескольким айсбергам позволило сопоставить масштабы временной изменчивости и пространственных различий. Характеристика синхронных отрезков приведена в табл. 6.

Таблица 6

Периоды синхронного дрейфа нескольких айсбергов

№	Дата начала и окончания, продолжительность (n)			Количество и перечень айсбергов	
	Начало	Окончание	n, сутки		
1	25/V	11/VI	18	4:	343, 362, 366, 367
2	30/V	7/VII	38	6:	343, 361, 366, 367, 371, 406
3	30/V	24/VII	55	3:	343, 361, 366
4	25/V	01/VIII	69	2:	343, 366
5	13/VII	07/VIII	26	2:	343, 942

Наиболее интересны первые три отрезка. С 30 мая по 7 июля имеются данные по шести айсбергам из восьми, по 24 июля (то есть почти 2 месяца) – по пяти айсбергам. С 25 мая по 11 июля имеются данные по четырем айсбергам, причем один из них (А-362, рис. 1) дрейфовал ближе к Новой Земле. На рис. 5а представлены совмещенные векторы $\vec{m}_P$ и эллипсы σ_P на последовательных одномесячных отрезках дрейфа одних и тех же айсбергов. Они демонстрируют сильные изменения от месяца к месяцу. На рис. 5б эти же характеристики получены по синхронному дрейфу нескольких айсбергов. Здесь видно, что пространственные контрасты многократно меньше временных различий. Отметим, что с 25 мая по 11 июня направление среднего дрейфа А-362 (у Новой Земли) противоположно направлению среднего дрейфа остальных айсбергов, но эллипсы дисперсии почти не различаются.

Еще нагляднее сильную пространственную сопряженность демонстрируют траектории синхронного дрейфа (рис. 5в). Графики траекторий геометрически подобны, причем это подобие проявляется как в форме треков, так и в одновременности (при суточном разрешении) наиболее заметных особенностей – резких смен направления дрейфа 15 июня и 29 мая. Особо отметим хронологическое подобие даже для А-362 при том, что он дрейфует в отличие от остальных айсбергов к востоку. Это позволяет считать, что эти изменения направления обусловлены ветром, тогда как неветровое течение сохраняло примерное постоянство направления.

Для количественной оценки пространственной сопряженности использованы оценки показателей коллинеарной $r_{\uparrow\downarrow}$, ортогональной $r_{\perp}$ корреляции скоростей дрейфа в инвариантной форме и индикатор векторной корреляции $\mu = \sqrt{r_{\uparrow\downarrow}^2 + r_{\perp}^2}$ [Иванов, 2004]. Расчет показал, что для синхронно дрейфующих айсбергов показатели $r_{\uparrow\downarrow}$ положительные и значительные по величине, а показатели $r_{\perp}$ знакопеременные и близкие

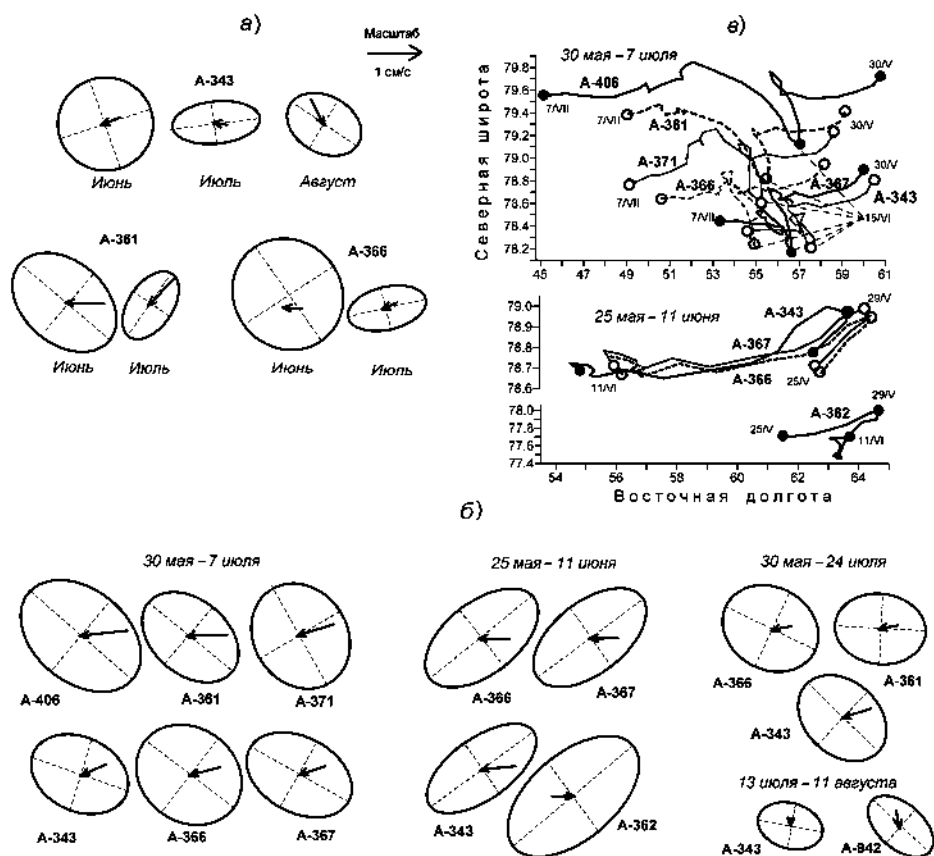


Рис. 5. Эволюция и пространственная изменчивость дрейфа айсбергов: а, б – совмещенные векторы математического ожидания и эллипсы СКО скорости дрейфа на одномесечных отрезках (а) и при синхронном дрейфе (б); в – датированные траектории синхронного дрейфа.

к нулю, то есть пространственная корреляция определяется однонаправленными изменениями взаимно-коллинеарных составляющих дрейфа. В табл. 7 приведены значения индикатора μ для синхронно дрейфовавших айсбергов.

Таблица 7

Индикатор пространственной корреляции на 5 отрезках синхронного дрейфа айсбергов

30 мая – 7 июля						25 мая – 11 июня			
Айсберг	361	366	367	371	406	Айсберг	362	366	367
343	0,75	0,90	0,92	0,84	0,76	343	0,72	0,94	0,95
361	1	0,85	0,78	0,84	0,89	362	1	0,62	0,64
366	–	1	0,92	0,91	0,88	366	–	1	0,99
367	–	–	1	0,85	0,83	30 мая – 24 июля			
371	–	–	–	1	0,87	Айсберг	361	366	–
–	–	–	–	–	–	343	0,72	0,94	–
–	–	–	–	–	–	361	1	0,82	–

Примечание: жирным шрифтом выделена ослабленная корреляция для айсберга А-362.

Согласно табл. 7 корреляция скоростей дрейфа для айсбергов южнее Земли Франца-Иосифа (рис. 1) велика – индикатор μ превышает 0,8, достигая в отдельных случаях 0,95–0,99. Ослабление корреляции до 0,75 происходит с увеличением расстояния между айсбергом А-343 и айсбергами А-361, 406. Заметно ослаблена корреляция дрейфа А-362 у Новой Земли с остальными айсбергами. Она составила 0,6–0,7, но все равно остается статистически значимой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрен дрейф восьми айсбергов в северо-восточной части Баренцева моря в мае–августе 2009 г. продолжительностью от 3 недель до 3 месяцев. Скорость дрейфа вычислена по GPS-измерениям координат с дискретностью 1 ч и сглажена на периоде 13 ч. Градиент давления определен по данным реанализа NCEP в узлах сетки с дискретностью 6 ч и проинтерполирован в точку положения айсберга. Показано хорошее взаимное соответствие полей давления по реанализу и по данным измерений.

2. Статистический анализ изменчивости среднесуточных значений скорости дрейфа и градиента давления выполнен на основе модели случайного евклидова вектора векторно-алгебраическим методом. Средняя скалярная скорость дрейфа изменялась от 5 до 10 см/с, максимальная скорость – от 20 до 35 см/с, модуль вектора математического ожидания – от 2 до 8 см/с при генеральном направлении дрейфа к западу у ЗФИ и к востоку у Новой Земли. Общее (по модулю и по направлению) СКО изменялось от 8 до 16 см/с, а форма эллипсов СКО варьировала от вытянутой 0,55 до близкой к окружности 0,90. Направление среднего переноса и ориентация эллипса СКО не совпадают. Характеристики изменчивости скорости дрейфа айсбергов и градиента атмосферного давления взаимоподобны.

3. Масштабы временной изменчивости скорости дрейфа существенно превосходят пространственные контрасты. Оценки коэффициентов изменчивости скорости дрейфа и градиента и синхронный дрейф нескольких айсбергов позволяют считать, что на дрейф оказывает влияние не только ветер, но и неветровое медленно меняющееся течение, направленное южнее ЗФИ к западу и юго-западу, а у Новой Земли к северо-востоку.

Количественные оценки сопряженности дрейфа с градиентом давления, ветровой и неветровой составляющих дрейфа были рассмотрены в предыдущей статье [Зубакин и др., 2013].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 264 с.
- Гудкович З.М., Доронин Ю.П. Дрейф морских льдов. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 110 с.
- Зубакин Г.К. Крупномасштабная изменчивость состояния ледяного покрова морей Северо-Европейского бассейна. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 160 с.
- Зубакин Г.К., Зуев А.Н., Майоров О.Н. Расчет полей скоростей дрейфа ледовых объектов и их статистических характеристик по данным съемки ледяного покрова с помощью радиолокационной станции бокового обзора «Торос» (описание программы РЛС-02) // Автоматизация сбора и обработки гидрометеорологической информации. Обнинск, 1978. Т. 2А(56). С. 25–36.
- Зубакин Г.К., Иванов Н.Е., Нестеров А.В. Сопряженность дрейфа айсбергов с полем атмосферного давления в северо-восточной части Баренцева моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 96. С. 26–40.

Иванов Н.Е. О характеристиках корреляции скоростей ветра, морских течений и дрейфа льда // Метеорология и гидрология. 2004. № 8. С. 61–72.

Иванов Н.Е., Висневский А.А., Соколов В.Т. Ветровой дрейф станции «Северный полюс-35» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 1 (87). С. 5–21.

Кочин Н.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 425 с.

Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bul. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 7. P. 437–470.

URL: <http://wdc.aari.nw.ru/datasets/ncep/> [Дата обращения 01.08.2013]

URL: http://www.aari.nw.ru/оперативные_данные/метеокарты [Дата обращения 01.08.2013]

Volkov V.A., Ivanov N.E., Demchev D.M. Application of a vectorial-algebraic method for investigation of spatial-temporal variability of sea ice drift and validation of model calculations in the Arctic Ocean // Journal of Operational Oceanography. 2012. Vol. 5. № 2. P. 61–71.

G.K. ZUBAKIN, N.E. IVANOV, A.V. NESTEROV

VARIABILITY ESTIMATES OF ICEBERG DRIFT SPEED AND PRESSURE GRADIENT IN THE NORTH-EASTERN BARENTS SEA

The drift of eight icebergs in the North-Eastern Barents Sea since end of May till August 2009 with duration of 20–90 days is studied. The algorithm for drift speed calculation is presented according to the GPS-measurements of geographical coordinates and the air pressure gradient based on NCEP reanalysis data. Daily mean variability of drift speed and spatial pressure gradient within the range of seasonal and synoptic variation is analyzed by vector- algebraic method in the invariant form based on stochastic Euclidean vector model. The iceberg average drift is westward and south westward south of Frantz Josef Land; close to Novaya Zemlya it is north-eastward. The magnitude of average vector drift speed is 2–8 cm/sec at average value of scalar speed of 5–10 cm/sec, 20–25 cm/sec at maximum. The total standard deviation is 8–16 cm/sec.

Keywords: the North-Eastern Barents Sea, the drift of icebergs, pressure gradient, Euclidean vector.

ОТ РЕДАКЦИИ

В предыдущем номере журнала в статье «Сопряженность дрейфа айсбергов с полем атмосферного давления в северо-восточной части Баренцева моря» этих же авторов были допущены неточности в формулах на стр. 28. Приносим извинения авторам и читателям.

	Напечатано	Следует читать
13-я строка сверху	$R_{\vec{r}}^2 \equiv \mu^2$	$\mu = \sqrt{r_{\uparrow\downarrow}^2 + r_{\perp}^2}$
20-я строка сверху	$r_{\uparrow\downarrow} = 0$, а $r_{\perp} = 0$	$r_{\perp} = 0$, а $r_{\uparrow\downarrow} > 0$

КОНЕЧНАЯ МОРЕНА И ОЗЕРНО-ЛАГУННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ В РАЗРЕЗЕ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОАЗИСА ХОЛМЫ ЛАРСЕМАНН, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА

канд. геол.-минерал. наук Н.Э.ДЕМИДОВ¹, д-р геогр. наук С.Р.ВЕРКУЛИЧ,
канд. геогр. наук О.В.ЗАНИНА¹, инженер Е.С.КАРАЕВСКАЯ¹,
канд. геол.-минерал. наук З.В.ПУШИНА², канд. геол.-минерал. наук Е.М.РИВКИНА¹,
инженер Д.Г.ШМЕЛЕВ³

¹ – ФГБУН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушкино, e-mail: nikdemidov@mail.ru

² – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: verkulich@aari.nw.ru

³ – МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва

Геологический разрез четвертичных отложений мощностью до 11 м на полуострове Брокнесс в оазисе Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) был изучен путем колонкового бурения и последующего комплексного лабораторного анализа кернов. Верхняя толща мощностью до 5 м представляет собой конечную морену, маркирующую границу последнего оледенения. Нижняя толща имеет мощность до 6 м и интерпретируется как озерно-лагунные отложения, образованные в условиях смешивания морской и пресной воды. Кровля озерно-лагунных отложений находится в настоящее время на высоте около 30 м над уровнем моря, что является свидетельством тектонического поднятия территории оазиса или падения уровня моря с момента образования данных отложений.

Ключевые слова: Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида, Последний ледниковый максимум, керны четвертичных отложений, геохимический анализ, диатомовый анализ, палеогеографическая реконструкция.

ВВЕДЕНИЕ

История динамического взаимодействия в системе ледниковый щит Антарктиды–шельфовые моря–свободные ото льда окраинные участки суши (оазисы) имеет большое значение для реконструкции эволюции южной полярной области Земли в четвертичное время. Хотя антарктические оазисы являются самыми малыми по площади компонентами этой системы, в разрезах их рыхлых отложений содержится важная информация об изменениях уровня моря и антарктического оледенения. Во время Последнего ледникового максимума (ПЛМ) оазисы в основном перекрывались ледниковым покровом, который снес с них большую часть плейстоценовых отложений. Тем более ценны для палеогеографов находки остатков толщ таких отложений на окраинах шестого континента. Одной из территорий, где они сохранились, является оазис Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида), расположенный на берегу залива Прюдс между шельфовым ледником Эймери и оазисом Вестфолль (рис. 1). На участках суши оазиса общей площадью около 40 км² размещается порядка 150 озер, осадки которых были объектом предшествующих палеолимнологических ис-

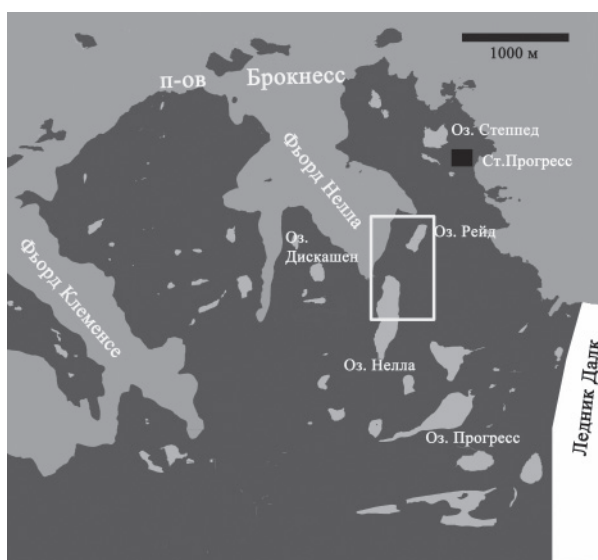


Рис. 1. Полуостров Брокнесе, оазис Холмы Ларсеманна. Белый прямоугольник показывает район проведения работ.

следований. Полученные значения датировок возраста осадков (от современного до 40000 л.н.) показали, что как минимум часть оазиса не была затронута оледенением во время ПЛМ [Burgess et al., 1994; Hodgson et al., 2001, 2005, 2006]. Более того, в отдельных низкорасположенных по отношению к морю озерах были обнаружены осадки возрастом 26650–28750 л.н., которые накапливались в озерно-морских условиях и свидетельствуют о подъеме относительного уровня моря в районе во время морской изотопной стадии (МИС) 3 [Hodgson et al., 2009].

В 2011–2012 гг. в Холмах Ларсеманн нами были проведены буровые работы, в результате которых удалось отобрать керны из геологического разреза с максимальной известной мощностью четвертичных отложений. Лабораторные исследования кернов (анализы водной вытяжки, метана и углерода, расчет коэффициента криогенной контрастности, диатомовый анализ и анализ ископаемых микрофоссилий) были нацелены на выявление генезиса выделенных здесь литологических разностей. Полученные данные и их интерпретация излагаются в статье.

МЕСТО И МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Полевые работы проводились с декабря 2011 г. по февраль 2012 г. в составе 57-й Российской антарктической экспедиции. В качестве района бурения был выбран перешийек озер Рейд и Нелла (см. рис. 1), где геоморфологические наблюдения указали на возможную максимальную мощность дисперсных четвертичных отложений. Озера и перешийек лежат в одной тектонической депрессии, вытянутой с юга на север (рис. 2). Поверхность перешейка линейно поднимается от озера Нелла (15 м над уровнем моря) к озеру Рейд (30 м над уровнем моря). В северной части перешейка, вдоль южного берега озера Рейд протягивается гряда с признаками морены. Относительное превышение гряды над уровнем озера Рейд составляет 4 м. Буровые скважины 1 и 2 расположены на этой гряде. Восточный и западный скальный борта депрессии достаточно круто поднимаются над озерами на высоту до 100 м. В западном борту есть

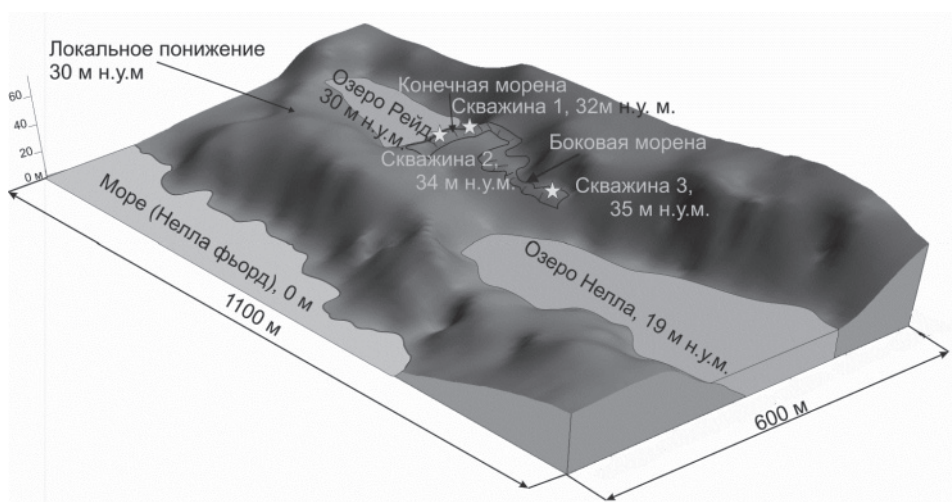


Рис. 2. Блок-схема района работ.

несколько локальных понижений, через которые происходит слив воды из озер Рейд и Нелла. На восточный борт долины прилегает мореноподобная боковая терраса, на которой располагается скважина 3.

Бурение велось буровой установкой УКБ-12/25 «всухую», без промывки и продувки, что обеспечило сохранение мерзлого состояния кернов для их корректного литологического описания и предотвращения их химической и биологической контаминации. При бурении мерзлых дисперсных пород применялись колонковые трубы с твердосплавными коронками. При достижении скального основания коронки сменялись на шарошечные долота, которыми осуществлялась проходка как минимум 0,5 м скальной породы для уверенного установления границы дисперсные/скальные породы. Встреченные в разрезе отдельные валуны скальных пород также проходились с помощью шарошек.

Керны поднимались на поверхность через каждые 30–70 см проходки, после литологического описания они в мерзлом виде помещались в морозильную камеру. С этого момента вплоть до доставки в лаборатории керны хранились при постоянной отрицательной температуре.

МЕТОДЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ водной вытяжки. Анализ содержания водорастворимых солей в отложениях проводился по стандартной методике [Аринушкина, 1970]. Соли извлекали добавлением воды в соотношении 1 к 5 по отношению к массе образца. Величину pH водной вытяжки определяли потенциометром (pH-метр Mettler TOLEDO, Seven Easy pH, Швейцария). Сухой остаток определяли выпариванием аликвоты водной вытяжки. Щелочность, обусловленную ионами HCO_3^- , определяли титрованием аликвоты водной вытяжки 0,02 н. H_2SO_4 , ионы Cl^- – аргентометрическим методом (по Мору), ионы SO_4^{2-} – гравиметрическим методом, Ca^{2+} и Mg^{2+} – комплексонометрическим методом, K^+ и Na^+ – методом фотометрии пламени (Пламенный фотометр BWB-XP Perfomance Plus, BWB-Technologies, Великобритания).

Коэффициент криогенной контрастности. Для определения палеомерзлотных условий и интенсивности процессов криогенного выветривания был рассчитан коэф-

фициент криогенной контрастности (ККК) – соотношение полевых шпатов и кварца в различных тонких фракциях отложений. Метод расчета ККК основан на разной устойчивости таких породообразующих минералов, как кварц и полевые шпаты, к многочисленным циклам промерзания–оттаивания. Известно, что процессы криогенного выветривания приводят к накоплению кварца и полевых шпатов в разных гранулометрических фракциях (0,05–0,01 мм и 0,1–0,05 мм соответственно) [Конищев, 1981]. Этот процесс выборочного разрушения может быть оценен по формуле [Konishchev, Rogov, 1993]:

$$\text{ККК} = (Q_1/F_1)/(Q_2/F_2), \quad (1)$$

где Q_1 – содержание кварца в фракции крупной пыли (%); F_1 – содержание полевых шпатов в фракции крупной пыли (%); Q_2 – содержание кварца в фракции тонкого песка (%); F_2 – содержание полевых шпатов в фракции тонкого песка (%).

Значения ККК больше 1,0 свидетельствуют об интенсивном влиянии криогенных процессов и выветривания в процессе накопления и промерзания отложений. Для принятия соответствующего характера распределения минералов необходимо, чтобы отложения находились не менее 2500 лет в зоне влияния криогенеза [Конищев и др., 2005]. При этом процессы криогенного выветривания, связанные с циклами промерзания–оттаивания, происходят только в деятельном слое. Таким образом, значения ККК могут служить индикатором скорости и условий промерзания и осадконакопления [Конищев, 1999]. Минеральный состав определялся в 8 образцах для фракций 0,1–0,05 и 0,05–0,01 мм с помощью рентгенофазового анализа [Ehrmann et al., 1992; Vogt, 1997] на приборе «Дрон-3м».

Определение содержания метана и углерода. Дегазация образцов для определения концентрации метана осуществлялась в полевых условиях непосредственно после получения кернов методом «head space» [Alperin, Reeburgh, 1985] в шприцах емкостью 150 мл. Газовая фаза перемещалась во флаконы для дальнейшего анализа. Содержание метана в пробах определялось в лаборатории на газовом хроматографе ХПМ-4 (Россия), оборудованном пламенно-ионизационным детектором [Ривкина и др., 2006]. Общее содержание углерода определялось на аппарате АН 752 У (Россия). Сжигание образца осуществлялось при температуре 1100 °С в токе кислорода с последующим потенциометрическим титрованием. Все анализы проводились в трехкратной повторности.

Изучение микрофоссилий. Для анализа были взяты 10 образцов мерзлых кернов. Образец массой 20 г, взятый методом квартования, кипятили в 10 % HCl, освобождали от ила отмучиванием и затем обогащали в тяжелой жидкости, с плотностью 2,2–2,3 г/см³. Полученная легкая фракция (остатки эпидермиса, детрит, фитолиты, спикулы губок, панцири диатомовых водорослей и т.д.) просматривалась на препаратах с глицерином на микроскопе Carl Zeiss при увеличении ×100, ×400, с применением фазового контраста. Фототаблицы были сделаны с помощью электронного микроскопа Vega3 Tescan.

Диатомовый анализ. В соответствии с методикой подготовки препаратов [Диатомовые водоросли, 1974] образцы помещались в раствор пирофосфата натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \times 10\text{H}_2\text{O}$) и отмывались в дистиллированной воде. Затем проводилось центрифугирование с использованием тяжелой кадмиевой жидкости с удельным весом 2,3 в течение 10 мин со скоростью 2500 об/мин. Всплывшую легкую фракцию с диатомеями отмывали от тяжелой жидкости. Препараты заключали в специальную

среду Эльяшева (с показателем преломления $n = 1,67\text{--}1,68$) на предметных стеклах. Просмотр диатомовых и их видовые определения производились на микроскопе Amplival Carl Zeiss Jena (увеличение $\times 1500$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Литология. Скважинами 1, 2 и 3 были вскрыты (рис. 3): верхняя литологическая фация (далее по тексту верхняя толща), нижняя литологическая фация (далее по тексту нижняя толща), скальные породы и два различных вида грунтовых льдов (мутный и белый лед).

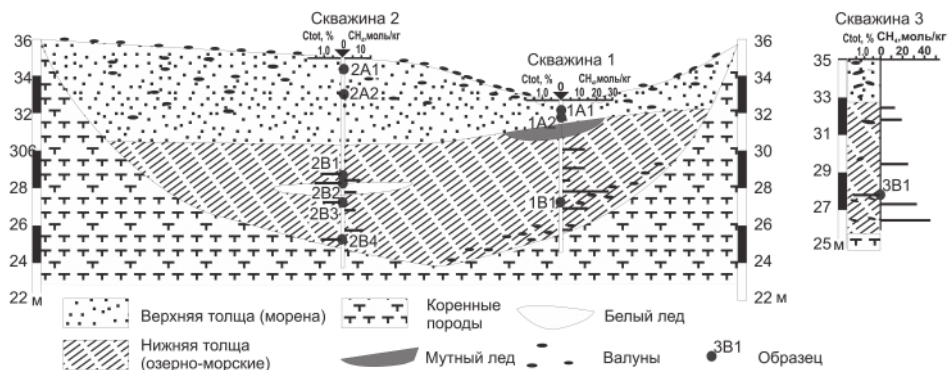


Рис. 3. Геологический разрез с указанием места отбора образцов, содержания углерода и метана.

Максимальная мощность верхней толщи составляет 5,5 м (скважина 2). Она сложена крупным и средним песком бурого или серого цвета с массивной криотекстурой. Верхние 1–2 м толщи содержат большое количество крупных обломков скальных пород (около 30 % по объему), которые выходят и на дневную поверхность. Диаметр обломков достигает 4 м. Камни имеют хаотическую ориентировку и, по-видимому, были принесены из различных мест, так как они не всегда петрографически идентичны слагающим борта долины горным породам.

Мутный грунтовый лед был вскрыт только в скважине 1 на глубине от 1,2–2,1 м. Для его верхней части характерна незначительная примесь песка и гравия, тогда как нижняя часть представляет собой ледогрунт с долей песка и гравия около 50 %. В скважине 1 мутный лед разделяет верхнюю и нижнюю толщи.

Нижняя толща залегает на скальных породах. Она представлена серыми и черными песками и супесями с небольшой примесью глинистых частиц. Отмечается чередование слоев толщиной в несколько десятков сантиметров с более высоким содержанием глинистых минералов (имеют черный цвет) и более низким (серый цвет). Встречаются единичные крупные обломки, доля гравийных частиц может достигать 20 % от объема. В отдельных прослоях видна косая слоистость с углом наклона около 45° по отношению к горизонту, которая подчеркивается либо прослоями красного цвета, сложенными зернами граната, либо косыми шлирами льда толщиной до 0,5–1,0 см. В большинстве случаев керны из данной толщи имели сильный запах органики.

Чистый белый лед был обнаружен в скважине 2 на глубинах 6,8–7,1 м. Он отличается от мутного льда из скважины 1 цветом и отсутствием примесей.

Состав водорастворимых солей. pH водной вытяжки обеих толщ отложений незначительно отличается и характеризуется слабокислыми значениями от 5,8 до

6,4 (табл. 1). В верхней и нижней толще в анионах преобладают Cl^- и SO_4^{2-} . Проведенный анализ показал различие изучаемых толщ по величине сухого остатка водной вытяжки: 0,04–0,08 весовых % в верхней толще и 0,08–0,18 весовых % в нижней толще. Исходя из полученных значений, по почвенной классификации верхняя толща является незасоленной, а нижняя – слабой степени засоленности [Классификация и диагностика почв СССР, 1970].

Таблица 1

Характеристика водной вытяжки

Индекс образца		Состав водной вытяжки (1:5), мг-экв/100 г сухого образца							Сухой остаток, весовой, %	pH
		HCO_3	Cl	SO_4	Ca	Mg	K	Na		
Верхняя толща	1A1	0,075	0,25	0,196	0,025	0,075	0,014	0,11	0,04	6,28
	1A2	0,075	0,2	0,162	0,05	0,075	0,041	0,043	0,08	6,4
	2A1	0,075	0,2	0,145	0,05	0,075	0,028	0,28	0,08	6,3
	2A2	0,1	0,2	0,102	0,025	0,05	0,039	0,039	0,08	6,7
Нижняя толща	1B1	0,075	0,225	0,213	0,075	0,15	0,088	0,093	0,08	6,2
	2B1	0,05	0,325	0,274	0,125	0,3	0,057	0,113	0,13	5,9
	2B2	0,05	0,425	0,693	0,325	0,55	0,073	0,198	0,17	5,8
	2B3	0,075	0,275	0,342	0,1	0,2	0,056	0,139	0,09	6,1
	2B4	0,05	0,45	1,198	0,525	0,3	0,155	0,384	0,18	5,8
	3B1	0,075	0,225	0,402	0,125	0,25	0,069	0,148	0,15	6,0

Коэффициент криогенной контрастности. Результаты расчета ККК для образцов из верхней толщи показали значения от 0,1 до 0,9, при среднем значении 0,6 (табл. 2). Для нижней толщи значения ККК изменяются от 0,8 до 1,6, при среднем значении 1,3. Максимальные значения ККК в этой толще обнаружены на глубине 6,3–6,5 м, в 1,5–1,7 м от кровли (сразу над грунтовым льдом), а минимальные приурочены к глубине 7,6 м.

Таблица 2

Содержание кварца и полевых шпатов (% от общего числа зерен) и значения ККК

Индекс образца		Глубина, м	Фракция, мкм	Кварц	Полевые шпаты	ККК
Верхняя толща	1A1	1,4	100–50 50–10	21 5	34 55	0,1
	2A1	1	100–50 50–10	50 47	45 48	0,9
	2A2	2	100–50 50–10	38 45	29 38	0,9
	1B1	6,5	100–50 50–10	25 29	63 49	1,5
Нижняя толща	2B2	6,7	100–50 50–10	20 21	58 38	1,6
	2B3	7,6	100–50 50–10	36 26	35 33	0,8
	2B4	9,6–9,8	100–50 50–10	13 27	30 46	1,4
	3B1	7,0–7,5	100–50 50–10	41 29	41 23	1,3

Содержание метана и углерода. Из результатов анализов следует (см. рис. 3), что во всех скважинах верхняя толща содержит на порядок меньше общего углерода (0,044–0,19 %), чем залегающие ниже отложения (1,02–1,68 %). В нижней толще метан содержится в концентрации от 5 до 44 мкмоль/кг, тогда как в верхней толще он не обнаружен.

Разнообразие микрофоссилий. Исследованные образцы можно разделить на две группы. Образцы 1A1, 1A2, 2A1, 2A2 (см. рис. 3) содержат много минеральной массы, угловатые частицы 20–50 мкм, мелкий бесструктурный детрит, много мелких обломков губок размером не более 15 мкм. В другой группе образцы 1B1, 2B1, 2B2, 2B3, 2B4, 3B1. Мацерат образцов темный и содержит в значительных количествах остатки спикул губок, створок диатомей и остатки тканей мхов. На фоне общего повышенного содержания органических остатков встречены крупные частицы (50–100 мкм), с хорошо различимой клеточной структурой. Растительные ткани представлены в основном остатками зеленых мхов: мхи больших родов *Drepanocladus* sp., *Polytrichum* sp., *Bryum* sp. семейств Bryaceae, Polytrichaceae, Amblystegiaceae подкласса Bryidae. Эти мхи широко распространены в экотопах от Арктики до Антарктики, в основном напочвенные, на скальные, эпифитные и водные.

Исследование диатомовых водорослей. В исследованных образцах обнаружены ископаемые диатомовые водоросли (9 пресноводных и 16 морских видов), 1 вид десмидиевых водорослей (Desmidiaceae), споры золотистых водорослей (Chrysophyta) (табл. 3). Морские диатомовые водоросли с относительно невысокими количественными оценками обнаружены в нижней толще образца 2B4 из основания скважины 2. Диатомеи представлены целыми створками *Podosira antarctica*, *Paralia sulcata*, *Thalassiosira gracilis*, спорами *Chaetoceros* sp., фрагментами створок других 12 видов, в том числе и единичными створками пресноводного вида *Gomphonema angustatum/parvulum*. Морской бентосный диатомовый вид *Podosira antarctica* был описан как новый таксон [Гогорев, Пушина, 2011] из отложений среднего-позднего миоцена массива Фишера (горы Принс-Чарльз, Восточная Антарктида). С применением электронной микроскопии детально изучены морфометрические характеристики вида, который ранее идентифицировался как *Hyalodiscus obsoletus* Sheshukova [Layba, Pushina, 1997]. Эти диатомовые также были обнаружены нами в плейстоценовых отложениях оазиса Вестфолль (Восточная Антарктида), острова Кинг-Джордж (Южные Шетландские острова), в донных голоценовых отложениях морского залива оазиса Бангера (Восточная Антарктида).

Виды рода *Chaetoceros* в изобилии встречаются в прибрежных районах Антарктики и отражают высокую первичную продуктивность и стабильные гидрологические условия [Stockwell, 1991]. Согласно Э.Левентер [Leventer, 1992], присутствие спор *Chaetoceros* может рассматриваться как показатель присутствия морского льда.

Другие образцы из нижних частей скважин 1, 2 и 3 содержат редкие фрагменты створок морских диатомей. В образце 2B2 диатомовые водоросли не обнаружены.

Ископаемые пресноводные диатомовые водоросли были выявлены главным образом в верхних частях скважин 1 и 2. В образцах 1A2 и 2A1 обнаружены пресноводные бентосные диатомеи *Gomphonema angustatum/parvulum*, *Psammothidium* aff. *abundans*, *P.* aff. *metakryophilum* и другие эпифиты. Створки диатомового вида *Gomphonema angustatum/parvulum* в основном сконцентрированы на маленьких органических фрагментах. В образце 1A2 установлены хорошо сохранившиеся

Встречаемость диатомовых водорослей в кернах в оазисе Холмы Ларсемани

Диатомовые водоросли	Скважина 1		Скважина 2							Скважина 3
			Индекс образца							
	1B1	1A2	1A1	2B4	2B3	2B2	2B1	2A2	2A1	3B1
Пресноводные и пресноводно-солончатководные виды										
<i>Cavinula cocconeiformis</i> (Gregory) Mann and Stickle		r						r		
<i>Diadesmis</i> sp.		r						r	f	
<i>Gomphonema angustatum</i> (Kützing) Rabenhorst/ <i>parvulum</i> (Kützing) (Kützing)		f								
<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehrenberg) Grunow		r		r						
<i>Luticola muticopsis</i> (Kützing) Mann		r								
<i>Psammothidium</i> aff. <i>abundans</i> (Manguin) Bukhtiyarova and Round		r						f	r	
<i>P. aff. metakryophilum</i> (Lange-Bertalot and Schmidt) Sabbe		r						f	r	
<i>Pinnularia cymatopleura</i> West and West		r						r	r	
<i>Stauriforma inermis</i> Flower, Jones and Round								r		
Морские виды										
<i>Chaetoceros</i> sp.										
<i>Cocconeis costata</i> var. <i>antarctica</i> Manguin										
<i>Cocconeis fasciolata</i> (Ehrenberg) Brown										
<i>Diploneis</i> sp.	fr		fr		fr					fr
<i>Ellerbeckia fisheriensis</i> Gogorev et Pushina				r						fr
<i>Eucampia antarctica</i> (Castracane) Manguin				r						fr
<i>Fragilariopsis kerguelensis</i> (O'Meara) Hustedt				fr						fr
<i>Paralia sulcata</i> (Ehrenberg) Kützing				r						
<i>Podosira antarctica</i> Gogorev et Pushina				fr						
<i>Stellarima microtrias</i> ? (Ehrenberg) Hasle et Sims				fr						
Sp. sp. (=Genus and species undetermined, Brady, 1979, p. 1.5, fig. 19)				fr						
<i>Thalassiosira gracilis</i> (Karsten) Hustedt				r						
<i>Thalassiosira lentiginosa</i> (Janisch) Fryxell				fr						
<i>Thalassiothrix</i> sp.				fr						
<i>Trachyneis aspera</i> (Ehrenberg) Cleve			fr	fr	fr		fr			fr
<i>Trigonium</i> sp.			fr	fr			fr			fr
Centricae			fr		fr		fr			
Pennatae										
Desmidiaceae								x		
<i>Cosmarium subitumidum</i> Nordsted								x		
Chrysophycean statospores										

Примечание. f (нередко) – около 20–30 экземпляров в препарате; r (редко) – 10–15 экземпляров; x (единично) – от 1 до 5; fr – фрагменты створок диатомовых водорослей.

створки пресноводных бентосных диатомей, немногочисленные покоящиеся споры золотистых водорослей (Chrysophyta) и единично встречены десмидиевые водоросли *Cosmarium subtumidum*. В комплексе диатомей доминируют пресноводные бентосные виды *Psammothidium* aff. *abundans*, *P.* aff. *metakryophilum*, *Cavinula cocconeiformis*, *Gomphonema angustatum/parvulum*. Антарктические эндемики *Psammothidium abundans* и *P. metakryophilum* – типичные пресноводные представители современного бентоса маленьких озер оазиса Холмы Ларсеманн и озер на островах в Западной Антарктике [Schmidt et al., 1990; Roberts, McMinn, 1999; Sabbe et al., 2003; Hodgson et al., 2005]. Также эти виды установлены в голоценовых отложениях пресных и солоноватых озер Антарктики, в том числе и озера Рейд в оазисе Холмы Ларсеманн. Пресноводный космополитный вид *Cavinula cocconeiformis* обитает в озерах Шпицбергена в воде с показателем pH 5,9 [Jones, Birks, 2004]. В исследованных образцах часто встречаются пресноводные бентосные виды диатомей *Pinnularia cymatopleura* и *Stauroforma inermis*. В соответствии с [Sabbe et al., 2003], *S. inermis* является доминирующим видом в диатомовых комплексах пресных и солоноватых озер Холмов Ларсеманн.

ОБСУЖДЕНИЕ

Верхняя толща – отложения конечной и боковой морены. Интерпретация отложений верхней толщи как отложений конечной и боковой морены обусловлена главным образом геоморфологическими и литологическими свидетельствами. U-образная долина озер Рейд и Нелла вместе с грядой, на которой пробурены скважины 1 и 2, а также террасой, на которой расположена скважина 3, имеют сильное сходство с ледниковой долиной. Гряда интерпретируется нами как конечная морена, а терраса как боковая морена. Крупные каменные обломки различных магматических и метаморфических пород с хаотической ориентацией и различной степенью выветрелости на поверхности гряды подтверждают этот вывод. В качестве дополнительных доказательств можно рассматривать отсутствие метана и низкое содержание углерода. Значения ККК ниже 1, полученные для образцов из верхней толщи, также согласуются с единовременным отложением и замерзанием. Вывод о том, что отложения верхней толщи являются мореной, не находит противоречия и в результатах анализа микрофоссилий, который показал здесь угловатый характер песчаных частичек и невысокое количество органического материала.

Нижняя толща – озерно-лагунные отложения. Вскрытые в трех скважинах отложения нижней толщи интерпретируются нами как озерно-лагунные. Это подтверждается при сравнении результатов лабораторных исследований. Практически во всех изученных образцах отложений нижней толщи (кроме образца 2B2) обнаружены морские диатомовые водоросли, но в некоторых образцах присутствуют и единичные створки пресноводных диатомей. Наличие метана в отложениях нижней толщи всех скважин указывает на их озерное или морское происхождение, тогда как вышележащие отложения метана не содержат. Повышенное на один порядок содержание углерода в нижней толще относительно морены в условиях Антарктиды трудно объяснить вне морской либо озерной обстановки осадконакопления. В отличие от пресных осадков морены, нижняя толща по характеру водной вытяжки относится к слабой степени засоления, что может являться еще одним свидетельством в пользу ее озерно-лагунного происхождения.

Кровля нижней толщи имеет абсолютные отметки, превышающие имеющиеся в западном борту понижения системы озер Рейд и Нелла, что исключает образова-

ние нижней толщи в исключительно озерных условиях. Образование в прибрежных условиях, в эпоху с более высоким относительным уровнем моря, снимает данное высотное несоответствие кровли отложений с бортами долины. Следует также отметить, что чисто морской генезис нижней толщи тоже должен быть исключен из-за наличия в ней не только морских, но и пресноводных диатомей, а также ввиду не- сильного засоления отложений. Вероятным является сценарий, когда седиментация происходила в пресноводной лагуне, которая затапливалась морской водой во время приливов, либо седиментация происходила в прибрежно-морских условиях при постоянном поступлении талой пресной воды от ледника.

Некоторые аспекты последнего оледенения и изменения уровня моря в районе оазиса. Проведенная диагностика генезиса верхней и нижней толщ отложений исследованного разреза позволяет обсудить вопросы, связанные с последним оледенением оазиса и изменениями относительного уровня моря. Хорошая сохранность морены (верхняя толща) указывает на то, что она была сформирована при последней подвижке ледника, который не дошел до северной окраины побережья полуострова Брокнесс (см. рис. 1, 2). Для уверенной корреляции этой морены с ледниковыми событиями ПЛМ [Global chronostratigraphic correlation table for the last 2,7 million years, 2010] или другими голоценовыми подвижками ледников необходимы дополнительные исследования. Однако предшествующие результаты изучения озерных осадков полуострова Брокнесс свидетельствуют о преобладании в голоцене тенденции к дегляциации этой территории и об отсутствии следов крупного повторного разрастания здесь ледниковых масс [Verleyen et al., 2004], что косвенно указывает на временную связь образования верхней толщи (морены) с событиями ПЛМ и последующей деградацией оледенения.

Накопление нижней толщи озерно-лагунных отложений происходило непосредственно перед последним крупным разрастанием оледенения в оазисе. Кровля этих отложений располагается на 32 м выше современного уровня моря. В предшествующих работах [Hodgson et al., 2009] были описаны осадки возрастом 26650–28750 л.н., образование которых проходило в озерно-морских условиях, что свидетельствует о трансгрессии моря во время МИС 3. Данные осадки находятся на высоте 8 м над уровнем моря в озере Кирижес Понд (Kirisjes Pond) на острове в 5 км на запад от полуострова Брокнесс. В качестве одного из возможных объяснений подъема относительного уровня моря в районе оазиса во время МИС 3 (когда глобальный уровень моря был на 60 м ниже современного) авторы предложили прогибание территории Холмов Ларсеманн под тяжестью мощного ледника. Морские отложения периода МИС 3 на современных высотных отметках до 35 м были изучены также на острове Кинг-Джордж, Южные Шетландские острова (Западная Антарктика) [Веркулич и др., 2013]. Все это свидетельствует в пользу образования озерно-лагунных отложений нижней толщи изученного нами разреза в период МИС 3. Однако однозначное подтверждение возрастных характеристик нижней толщи смогут дать лишь дальнейшие работы и, в частности, проведение радиоуглеродного датирования возраста отложений.

ВЫВОДЫ

В оазисе Холмы Ларсеманн был изучен разрез с максимально известной здесь на данный момент мощностью четвертичных отложений. Выделение в разрезе двух толщ отложений различного генезиса было проведено на основании изучения литологии кернов, анализа водной вытяжки, расчетом коэффициента криогенной контрастности, анализом содержания метана и углерода, анализом микрофоссилий и диатомовым

анализом. Верхняя толща мощностью до 5 м представляет собой конечную морену, маркирующую границу последнего оледенения (предположительно ПЛМ). Нижняя толща имеет мощность до 6 м и сложена озерно-лагунными отложениями, образованными в условиях смешивания морской и пресной воды (предположительно в период МИС 3). Нахождение кровли лагунно-озерных отложений на высоте около 30 м над уровнем моря является свидетельством тектонического поднятия территории оазиса или падения уровня моря со времени формирования данных отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариниушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
- Веркулич С.Р., Дорожкина М.В., Пушина З.В., Татур А., Сухомлинов Д.И., Крылов А.В.* Условия интерстадиала (MIS3) и характер оледенения последнего ледникового максимума на острове Кинг-Джордж (Западная Антарктика) // Лед и снег. 2013. № 1 (121). С. 111–117.
- Гогорев Р.М., Пушина З.В.* Некоторые центрические диатомовые из неогеновых отложений массива Фишер (горы Принс-Чарльз, Восточная Антарктида) // Новости систематики низших растений. 2011. Т. 45. С. 32–49.
- Диатомовые водоросли СССР. Т. 1. Л.: Наука, 1974. 400 с.
- Конищев В.Н.* Формирование состава дисперсных пород в криолитосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 197 с.
- Конищев В.Н.* Эволюция температуры пород арктической зоны России в верхнем кайнозое // Криосфера Земли. 1999. Т. III. № 4. С. 39–47.
- Конищев В.Н., Лебедева-Верба М.П., Рогов В.В., Сталина Е.Е.* Криогенез современных и позднелейстоценовых отложений Алтая и перигляциальных областей Европы. М.: ГЕОС, 2005. 128 с.
- Ривкина Е.М., Краев Г.Н., Кривушин К.В. и др.* Метан в вечномёрзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 3. С. 23–41.
- Alperin M.J., Reeceburgh W.S.* Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Appl. Environ. Microbiol. 2006. Vol. 50. P. 940–945.
- Burgess J.S., Spate A.P., Shevlin J.* The onset of deglaciation in the Larsemann Hills, Eastern Antarctica // Antarctic Science. 1994. Vol. 6. P. 491–495.
- Ehrmann W., Melles M., Kuhn G., Grobe H.* Significance of clay mineral assemblages in the Antarctic Ocean // Marine Geology. 1992. Vol. 107. P. 249–273.
- Global chronostratigraphical correlation table for the last 2,7 million years / Coben K.M., Gibbard P.L. (ed.). IUGS, 2010.
- Hodgson D.A., Noon P.E., Vyverman W., Bryant C.L., Gore D.B., Appleby P., Gilmour M., Verleyen E., Sabbe K., Jones V.J., Ellis-Evans J.C., Wood P.B.* Were the Larsemann Hills ice-free through the Last Glacial Maximum? // Antarctic Science. 2001. Vol. 13. № 4. P. 440–454.
- Hodgson D.A., Verleyen E., Sabbe K., Squier A.H., Keely B.J., Leng M.J., Saunders K.M., Vyverman W.* Late Quaternary climate-driven environmental change in the Larsemann Hills, East Antarctica, multiproxy evidence from a lake sediment core // Quaternary Research. 2005. Vol. 64. P. 83–99.
- Hodgson D.A., Verleyen E., Squier A.H., Sabbe K., Keely B.J., Saunders K.M., Vyverman W.* Inter glacial environments of coastal east Antarctica: comparison of MIS1 (Holocene) and MIS5e (Last Interglacial) lake-sediment records // Quaternary Science Reviews. 2006. Vol. 25. P. 179–197.
- Hodgson D.A., Verleyen E., Vyverman W., Sabbe K., Leng M.J., Pickering M.D., Keely B.J.* A geological constraint on relative sea level in Marine Isotope Stage 3 in the Larsemann Hills, Lambert Glacier region, East Antarctica (31366–33228 cal yr BC) // Quaternary Science Reviews. 2009. doi:10.1016/j.quascirev.2009.06.006.

- Jones V.J., Birks H.J.B.* Lake-sediment records of recent environmental change on Svalbard: results of diatom analysis // *Journal of Paleolimnology*. 2004. Vol. 31. P. 445–466.
- Konishchev V.N., Rogov V.V.* Investigations of cryogenic weathering in Europe and Northern Asia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 1993. Vol. 4. P. 49–64.
- Laiba A.A., Pushina Z.V.* Cenozoic glacial-marine sediments from the Fisher Massif (Prince Charles Mountains) // *The Antarctic Region. Geological Evolution and Processes. Proceedings of the VII International Symposium on Antarctic Earth Sciences*. Ricci C. A. (ed.). Siena: Terra Antarctica Publishers., 1997. P. 977–984.
- Leventer A.* Modern distribution of diatoms in sediments from the George V Coast, Antarctica // *Mar. Micropal.* 1992. Vol. 19. P. 315–332.
- Roberts D., McMinn A.* Diatoms of the saline lakes of the Vestfold Hills, Antarctica // *Bibliotheca Diatomologica*. 1999. Vol. 44. P. 1–83.
- Sabbe K., Verleyen E., Hodgson D.A., Vanhoutte K., Vyverman W.* Benthic diatom flora of freshwater and saline lakes in the Larsemann Hills and Rauer Islands, East Antarctica // *Antarctic Science*. 2003. Vol. 15. P. 227–248.
- Schmidt R., Mausbacher R., Muller J.* Holocene diatom flora and stratigraphy from sediment cores of two Antarctic lakes (King George Island) // *Journal of Paleolimnology*. 1990. Vol. 3. P. 55–74.
- Stockwell D.A.* Distribution of *Chaetoceros* resting spores in the Quaternary sediments from Leg 119/College Station, TX Ocean Drilling Program, J. Barron, B. Larsen et al. (ed.) // *Proc. ODP, Sci. Results*. 1991. P. 599–603.
- Verleyen E., Hodgson D.A., Sabbe K., Vyverman W.* Late Quaternary deglaciation and climate history of the Larsemann Hills (East Antarctica) // *Journal of Quaternary Science*. 2004. Vol. 19. P. 361–375.
- Vogt C.* Regional and temporal variations of mineral assemblages in Arctic Ocean sediments as climatic indicator during glacial/interglacial changes // *Reports on Polar Research*. Bremerhafen. 1997. Vol. 251. P. 1–309.

*N.E.DEMIDOV, S.R.VERKULICH, O.V.ZANINA, E.S.KARAEVSKAYA, Z.V.PUSHINA,
E.M.RIVKINA, D.G.SHMELEV*

THE END MORaine AND LACUSTRINE-MARINE SEDIMENTS IN THE CROSSECTION OF QUATERNARY DEPOSITS OF THE LARSEMMANN HILLS, EAST ANTARCTICA

The geological cross-section of Quaternary deposits 11 m depth in the Larsemann Hills oasis was studied by rig drilling and complex laboratory analyses of cores. Upper stratigraphic unit 5 meter depth was interpreted as an end moraine marking the position of the last glaciation. Lower stratigraphic unit has thickness 6 meters and is interpreted as lacustrine-marine sediments deposited in conditions of fresh and sea water mixing. The upper boundary of lower unit is located 30 m above sea level, that allows to assume tectonics upward movement or sea regression after formation of lacustrine-marine sediments.

Keywords: Larsemann Hills, East Antarctic, Last glacial maximum, cores of quaternary deposits, geochemical analysis, diatom analysis, paleogeographic reconstruction.

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О ДИСЛОКАЦИЯХ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ
ОТЛОЖЕНИЯХ ПОЛУОСТРОВОВ ЯМАЛ И ГЫДАН
И СВЯЗАННЫХ С НИМИ НОВЕЙШИХ
ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЯХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ЭКСПЕДИЦИИ «ЯМАЛ–АРКТИКА-2012»**

*аспирант А.В.БАРАНСКАЯ^{1,3}, д-р геогр. наук Д.Ю.БОЛЬШИЯНОВ^{2,1},
магистрант Ю.И.КУЧАНОВ¹, инженер В.М.ТОМАШУНАС*

¹ – Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, e-mail: Alisa.baranskaya@yandex.ru.

² – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: bolshiyarov@aari.ru.

³ – Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, г. Москва.

В работе рассмотрены два участка побережья Карского моря, исследованные в ходе экспедиции «Ямал–Арктика-2012», где в четвертичных отложениях береговых клифов были отмечены деформации и складчатые дислокации. Как на восточном берегу Байдарацкой губы, так и в юго-западной части Енисейского залива в новейших осадках обнаружены складки различных форм, размеров и происхождения. Описана их морфология, обоснованы предположения генезиса; для каждого участка выделены дислокации, вызванные исключительно тектоническими движениями и динамическим влиянием разрывных нарушений фундамента.

Ключевые слова: Ямал, Гыдан, геоморфология, неотектоника, четвертичные отложения, дислокации.

ВВЕДЕНИЕ

Геологическое и геоморфологическое изучение полуостровов Ямал и Гыдан ведется с начала прошлого века. Наибольшую интенсивность оно приобрело после обнаружения многочисленных месторождений углеводородов, вызвавшего бум хозяйственного освоения региона. Тем не менее из-за труднодоступности, суровых климатических условий и отсутствия развитой дорожной сети в геологии Ямала до сих пор остается место для открытий. Экспедиция морского базирования «Ямал–Арктика-2012» дала возможность провести полевые работы в участках, слабо изученных до настоящего времени. В ходе экспедиции изучено 7 ключевых точек, описаны и задокументированы разрезы четвертичных отложений, а также рельеф посещенных участков.

Несмотря на живой интерес к структурной геологии региона, его тектоническое строение и особенности вертикальных и горизонтальных движений земной коры (в особенности новейших) остаются предметом споров и смутных догадок. Полуостров Ямал является северо-западной оконечностью Западно-Сибирской низменности, представляющей собою эпигерцинскую платформу, покров которой сложен

слабо дислоцированными породами мезозойской и кайнозойской групп [Герман, 1963]. Изучение структуры фундамента затруднено ввиду мощности осадочного чехла более 5 км [Астафьев, Скоробогатов, 2006], оставляющей возможность «заглянуть» в глубь земной коры лишь благодаря геофизическим исследованиям.

Тем не менее эндогенные особенности в любом регионе, даже в условиях стабильной платформы с развитым чехлом, не могут не оказывать влияния, пусть даже и косвенного, на топографию и внешний облик территории. В рамках экспедиции «Ямал–Арктика-2012» удалось провести ряд таких работ по изучению деформаций в четвертичных отложениях Ямала с целью выявления неоднородностей фундамента и тенденций новейших движений земной коры.

МЕТОДИКА

В то время как для складчатых областей и кристаллических щитов методика изучения новейшей структуры и современных тектонических движений геоморфологическими средствами разработана детально [Михайлов, 1984], для платформенных областей с мощным чехлом новейших отложений требуется отдельная, своеобразная методика, которая все еще нуждается в разработке и дополнениях.

Одним из подобных методов может стать линеаментный и морфоструктурный анализ, проводимый с учетом особенностей региона [Ласточкин, 1976; Авенариус, 2004; Baranskaya, 2012 и др.]. Суть анализа заключается в выделении линеаментов – линейных аномалий в рельефе, отвечающих разломам, геологическим телам или ослабленным зонам, и исследовании их структуры. Линеаменты выделяются на основании дистанционных методов и по результатам полевых маршрутных наблюдений.

Одним из способов проследить связь разломов и зон трещиноватости фундамента со строением осадочного чехла в поле является изучение дислокаций в четвертичных отложениях. На ключевых участках производилось изучение разрезов рыхлых отложений; определялся генезис и возраст пород. Описывались, фотографировались и зарисовывались все обнаруженные деформации: складки, флексуры, разрывы со смещением, блоки-отторженцы и др. Их местоположение привязывалось с помощью GPS; привязка дублировалась с помощью топографических карт и геодезических знаков. Измерялись морфометрические показатели дислокаций: линейные размеры, высота над уровнем моря и от верха разреза, уклоны крыльев складок, вергентность, частота встречаемости и др. Кроме того, производилось геоморфологическое описание точек согласно стандартным полевым методам, принятым в геоморфологии [Рычагов, 2006]. Затем, исходя из анализа всех названных параметров, выдвигалась гипотеза о происхождении и возрасте обнаруженных дислокаций.

Плюсы методики изучения новейших тектонических движений с помощью методов четвертичной геологии и геоморфологии в регионах с развитием мощного осадочного чехла заключаются в том, что по деформациям в рыхлой толще можно определить время последней активности разрывного нарушения. Тем не менее зачастую довольно сложно отделить «тектонические» дислокации от нарушений, вызванных экзогенными силами, для чего необходима классификация деформаций и выработка критериев их различия по генезису.

КЛЮЧЕВЫЕ УЧАСТКИ

Из 7 ключевых участков, где проводились работы в ходе экспедиции «Ямал–Арктика-2012», предположительно тектонические дислокации в четвертичных от-

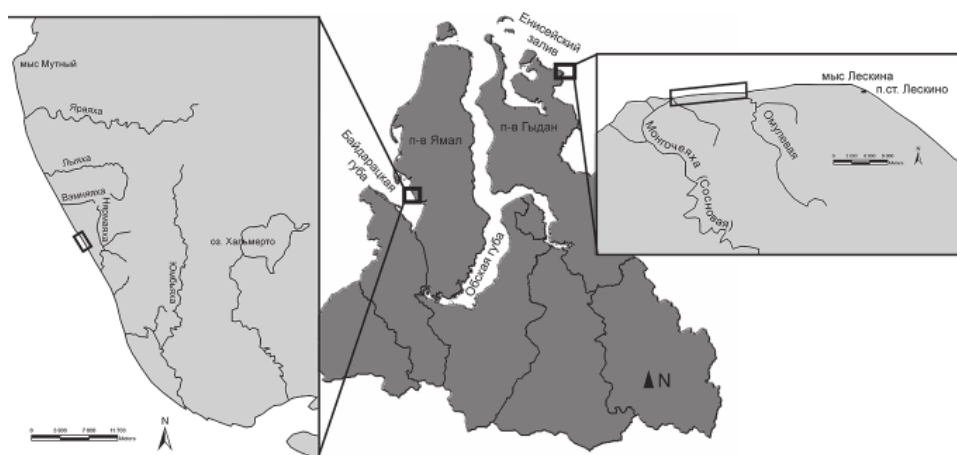


Рис. 1. Ключевые участки, изученные в ходе экспедиции «Ямал–Арктика-2012». Разрезы, для которых выполнялись полевые описания деформаций в рыхлых отложениях, выделены черными прямоугольниками

ложениях были обнаружены в двух районах: на восточном побережье Байдарцакой губы и на западном берегу Енисейского залива (рис. 1).

ИЗУЧЕННОСТЬ, ПРОБЛЕМЫ И СПОРНЫЕ ВОПРОСЫ ЧЕТВЕРТИЧНОЙ ГЕОЛОГИИ И НЕОТЕКТОНИКИ ПОЛУОСТРОВОВ ЯМАЛ И ГЫДАН

Для изучения генезиса деформаций в рыхлых отложениях необходимо полное представление о палеогеографической обстановке, в которой они могли формироваться.

Для Ямала картина является сложной, так как в современной научной среде существует множество порой противоречащих мнений о четвертичной истории севера Западной Сибири, а соответственно, и преобладавших факторах рельефообразования.

Выделяется две противоборствующие палеогеографические концепции развития рельефа и отложений полуострова Ямал в четвертичное время: гляциалистская [Астахов, 1989; Архипов, 1990] и маринистская [Герман и др., 1963; Каневский и др., 2005]. Согласно первой, территория Ямала и Гыдана в плейстоцене подвергалась воздействию покровных оледенений, количество и мощность которых многократно обсуждались и пересматривались в течение всего XX века. Впоследствии, благодаря международной программе «Четвертичные палеоландшафты Евразийского Севера» [Quaternary..., 2004; Svendsen et al., 2004], были изучены и продатированы многие опорные разрезы, после чего был сделан вывод о том, что последний раз ледники доходили до Ямала не позже чем 40 000 лет назад [Forman et al., 2002; Астахов, 2009]. Соответственно во время максимума последнего оледенения здесь предположительно господствовала аридная обстановка с преобладанием криогенных и эоловых процессов, а ледники не выходили за пределы Полярного Урала [Mangerud et al., 2008].

Если следовать гляциалистской концепции, часть деформаций могла быть вызвана напорным действием древнего ледника, который, надвигаясь на нижележащие отложения, сминал их в складки. Необходимо тщательное изучение подобных гляциодислокаций и их классификация для возможности впоследствии отличить их от сугубо тектонических. Тем не менее следует учитывать, что складки в отложениях

моложе 40 тысяч лет не могли быть вызваны напорным действием ледников из-за их отсутствия в то время на территории Ямала.

Согласно маринистской концепции [Герман и др., 1963; Каневский и др., 2005; Стрелецкая и др., 2006], оледенений на Ямале в поздненеоплейстоценовое время не существовало вовсе, большая часть отложений имеет морское происхождение и все деформации в рыхлых отложениях образовались благодаря тектоническим движениям или в результате многократного промерзания и оттаивания толщи.

Неразрешенным остается вопрос о тенденции и знаке преобладающих вертикальных неотектонических движений на полуострове Ямал. В советское время господствовала точка зрения о том, что для платформы с чехлом, в котором мощность одних лишь четвертичных отложений составляет от 246 до 290 м [Герман и др., 1963], характерен режим долговременного стабильного опускания [Николаев, 1962]. Однако позднее сторонники маринистской концепции признали, что неоплейстоцен (в особенности верхний) представлял собой этап восходящего тектонического развития территории. С ним связана регрессия основного морского бассейна и колебания уровня Карского моря, которые привели к формированию двух верхнеплейстоценовых морских террас [Данилов, 1970].

Данные о современных колебаниях уровня моря обобщены в Арктическом и антарктическом НИИ [Ашик и др., 2010]. Согласно этим данным большинство побережий Российской Арктики испытывает наступление уровня моря. Только в трех регионах: 1 – архипелаг Шпицберген, архипелаг Земля Франца-Иосифа, Северный остров архипелага Новая Земля; 2 – Хатангский и Оленёкский заливы; 3 – Обская и Байдарацкая губы – имеет место устойчивое понижение уровня моря. Особенно оно велико за последние 60 лет в третьем из перечисленных регионов. Это поведение уровня моря в районе исследований противоречит длительному унаследованному погружению Западно-Сибирской низменности.

Новые геофизические данные выявили неоднородность фундамента платформы, в котором обнаружены многочисленные горсты и грабены, синклинии и антиклинии, вертикальная амплитуда между ними достигает километров [Астафьев, Скоробогатов, 2006] – величина, сравнимая с высотой новейших горных образований. В верхнем течении р. Нямяхи в восточной части возвышенности Хой давно описано несколько выходов пород, предположительно отнесенных к верхнему мелу. Эти данные позволяют высказать предположение, что образование возвышенности Хой также связано с проявлением тектоники и выходы коренных пород в ее пределах могут быть не единственными [Герман, 1963].

Таким образом, существует необходимость изучения следов проявления новейших тектонических движений в рыхлых отложениях полуостровов Ямал и Гыдан для прояснения спорных вопросов четвертичной геологии, палеогеографии и неотектоники региона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Ямальский берег Байдарацкой губы на участке от устья реки Нямяхи до устья реки Вэмяхи

Ямальский берег Байдарацкой губы на изученном участке представляет собой слабонаклонную поверхность высотой 25–30 м, повышающуюся до 40 м и выделяемую некоторыми исследователями в качестве высокой террасы. Плоскую вершинную по-

верхность прорезают многочисленные термоэрозионные овраги и ложбины, русла рек. Нами был изучен участок между устьями рек Вэмняха и Нярмаха (рис. 1). Исходя из линейной структуры территории и распределения эрозионного расчленения, новейший структурный план находит значительное проявление в рельефе; можно предположить наличие дифференцированных движений фундамента на всем протяжении побережья от мыса Мутный до Юмбяхи, включающего исследованный нами район.

Согласно предыдущим морфоструктурным исследованиям, проводившимся на восточном побережье Байдарацкой губы [Романенко и др., 2009], берег делится на несколько блоков. От мыса Мутный до устья Яраяхи (рис. 1) наблюдается незначительное погружение. Участок от устья Яраяхи до устья Лыяхи стабилен, со слабой тенденцией к воздыманию. Рельеф здесь расчленен слабо; вершинная поверхность заболочена.

Изученный участок от Вэмняхи до Нярмахи предположительно наиболее активен в тектоническом отношении. Он в наибольшей степени изрезан эрозионной сетью, причем большая часть термоэрозионных оврагов и долин ручьев не выходит к берегу, а ориентирована в восточном или юго-восточном направлении. Причины подобной неоднородности могут заключаться в сгущении разломов и трещин в кристаллическом фундаменте, перекрытом рыхлыми отложениями, в обследованном нами районе.

Ф.А.Романенко и др. выделяют участок между реками Нярмаха и Вэмняха как область интенсивных восходящих тектонических движений. Такая картина представляется логичной, поскольку на изученном участке наблюдается наибольшее врезание рек по сравнению с областями к северу и к югу. Высоты самой вершинной поверхности здесь также максимальны.

Южнее лежит блок долины реки Юрибей, обладающий тенденцией к опусканию; раздел проходит по борту долины Юмбяхи [Романенко и др., 2009].

На изученном нами участке поверхность обрывается к морю крутым (до 80–90°) уступом высотой 25–30 м. Уступ практически идеально ровный, байджарахи отсутствуют. В обнажающейся толще заметны многочисленные деформации. Для их классификации и выяснения генезиса и возраста был изучен разрез рыхлых отложений, в свою очередь являющийся частью многокилометрового стратотипического для юго-западного Ямала обнажения, протягивающегося от мыса Мутный до устья Юмбяхи.

На самом севере, у мыса Мутный, вскрывается так называемый карский диамиктон – глинистая толща с обломочным материалом [Романенко и др., 2007]. Карский диамиктон был тщательно описан в районе, расположенном на побережье Байдарацкой губы еще дальше к северу, близ поселка Марре-Сале, где он перекрывает отложения Марресальской свиты. Возраст оледенения, оставившего диамиктон, составляет более 40 000 лет [Forman et al., 2002]. Эта же толща вскрывается близ мыса Мутный, а к югу от него ее неровная кровля погружается и уходит под урез моря. Далее к югу она предположительно подстилает отложения разреза высокой террасы, изредка вскрываясь в основании береговых обрывов.

Основную часть обнажения южнее, от Яраяхи до Лыяхи, составляют пески общей мощностью более 30 м. Они имеют сложно построенную слоистость, образованную глинистыми или обогащенными растительным детритом прослоями. Песчаная толща характеризуется континентальным типом засоления; датирована радиоуглеродным методом от 22,5 (1 дата) до 44,9–49,6 (3 даты) тыс. л.н., т.е. на пределе работы метода [Романенко и др., 2007]. Толща включает обломки и створки

раковин морских моллюсков, кости и бивни мамонтов. На некоторых участках слои смяты в складки [Романенко, 2009].

К югу, между Лыяхой и Взмняххой, пески постепенно фациально замещаются ритмитами – серыми ленточными алевролитами с редкими прослоями светло-серого тонкозернистого песка, подчеркивающими слоистость, которые и вскрываются на изученном нами участке.

Нами было произведено полное описание разреза ленточных алевролитов (ритмитов), вскрывающихся в уступе высокой поверхности, отобраны образцы на анализ фораминифер и гранулометрический анализ, описаны дислокации, встречающиеся в толще.

Генезис ритмитов, как и самой террасы, остается спорным. Наиболее вероятны два варианта – морское или озерное накопление. Основываясь на ленточном строении толщи, а также на том, что в разрезе отсутствуют фаунистические остатки и в литературе упоминаний о находках морской фауны на восточном берегу Байдарацкой губы не встречается, можно предположить озерный генезис толщи. По-видимому, она составляет один комплекс с песками, лежащими к северу. Толща, вероятно, накапливалась в приледниковом или послеледниковом подпрудном озере, однако в связи с различиями в гидродинамике палеоводоема крупность осадков в нем была неоднородна. Этим может объясняться и постепенное фациальное замещение с нечеткой границей. Если следовать гляциалистской концепции, озеро могло существовать после ухода ледника, принесшего карский диамиктон, около 45–50 тысяч лет назад. Несмотря на отсутствие органического материала в толще глин и ритмитов, это время подтверждают радиоуглеродные датировки песков [Романенко и др., 2007].

На исследованном участке берегового обрыва чередуются отрезки, где глины залегают горизонтально, с небольшими слабоволнистыми нарушениями, и отрезки, где они смяты в сложные складки различной формы и размера.

Дислокации видны и на поверхности цокольной осушки, где размываются слоистые сизые глины, также смятые в сложные складки. Иногда они перекрыты песком мощностью до 0,5–1 м; на поверхности заметны высыпки слабо окатанной средней гальки.

Несмотря на отсутствие наклона слоев и единообразие литологического состава, складки и дислокации распределены неоднородно. Отмечены участки их сгущения и участки, где на протяжении сотен метров слои залегают горизонтально или являются слабоволнистыми.

Сами дислокации также значительно отличаются друг от друга по форме и размерам. Задokumentировано 6 типов складок (рис. 2).

Типы 1, 4 характеризуются относительно крупными размерами (до десятков метров в поперечнике), прямолинейной формой и отсутствием завитков и фестонов, за исключением мелких следов криотурбаций. Такие дислокации можно отнести к тектоническим. Первый тип представлен флексурами с перепадом высот между слоями до 2 м и длиной до 2,5–3 м. Перегибы обычно острые. Наличие флексур подобного типа трудно объяснить другим механизмом, кроме как наличием горизонтального растяжения, приводящего к скольжению блоков по сбросам и изгибам вышележащих слоев. Складки 2-го и 3-го типов также относятся к тектоническим, однако они могут иметь и криогенную компоненту формирования: по ослабленным зонам внедряются ледяные тела, которые затем, проталивая, усиливают уклоны крыльев складки. Такой

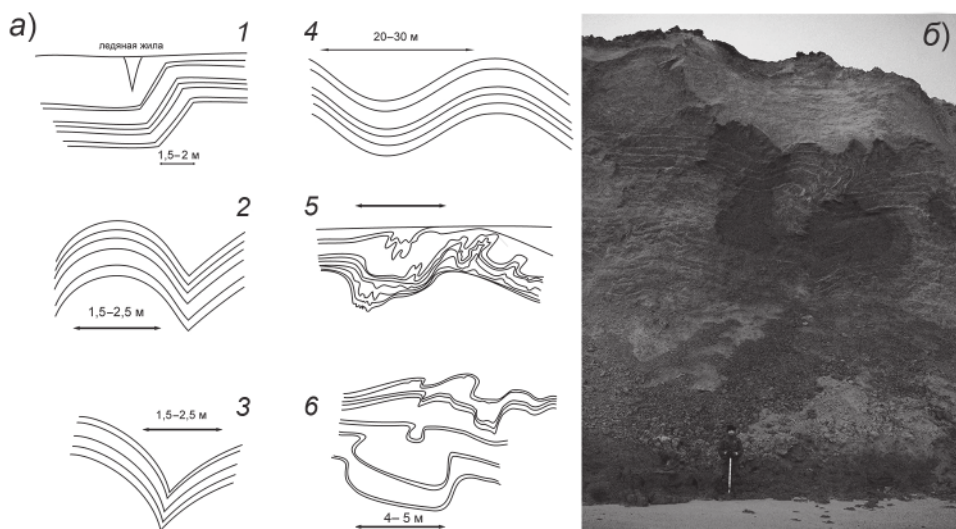


Рис. 2. Дислокации: а – виды дислокаций в ритмитах, выкрывающихся в обрывах между реками Вэмняха и Нярямаха, б – дислокация вида 5. Фото А.В.Баранской.

механизм может преимущественно наблюдаться у складок небольшого диаметра, однако у некоторых диаметр может достигать многих десятков метров.

Складки 5-го типа совершенно иные по текстуре и структуре. Их рисунок намного мельче (хотя общие размеры сопоставимы со складками первых четырех типов), наблюдаются многочисленные зубчики и фестончатые края. Часто встречаются опрокинутые крылья, чего ни разу не замечено для складок первых четырех типов. Механизм их формирования можно толковать двояко. С одной стороны, это могут быть наиболее масштабные следы криотурбации – нарушения залегания пород при их промерзании. С другой стороны, Е.В.Герман [1963] описывает механизм образования подобных складок на других участках Ямала как нарушение равновесия илистых полужидких пластичных осадков, отложившихся на наклонном дне. Для образования подводных оползней в результате обычного гравитационного перемещения по склону достаточно совсем незначительных углов наклона. Он отмечает, что оползни возникают на склонах подводных антиклинальных складок, что совпадает с положением изученного участка как привершинного склона наиболее активно воздымающейся области. Наклон всех подобных складок к югу, то есть к более низкому блоку, подтверждает гипотезу. Складки 6-го типа являются промежуточными, здесь могли сочетаться криологические, оползневые и тектонические процессы, приводящие к образованию сложных рисунков слоев.

Наиболее сложным является вопрос, не вызваны ли описанные складки типов 1–4, отнесенные нами к тектоническим, напорным действием древнего ледника. Если соглашаться с гляциалистской гипотезой, то севернее на том же берегу Байдарачьей губы встречаются примеры гляциодислокаций: это смятые в остроугольные складки породы марресальской свиты [Forman et al., 2002]. Тем не менее есть ряд существенных различий, позволяющих опровергнуть такую гипотезу. Во-первых, марресальская свита древнее карского диамиктона; очевидно, что ледник возрастом более 40 тыс. лет надвигался уже после образования этих отложений и легко мог

сминать их. В нашем же случае ритмиты лежат стратиграфически выше карского диамиктона (или, поскольку их подошва уходит под уровень моря, не исключен вариант фациального замещения), а более молодых морен и других свидетельств оледенения обнаружено не было. Ритмиты формировались или после ледникового покрова, или одновременно с ним у его края, что не могло привести к подобным дислокациям. Поскольку криогенные дислокации и дислокации конседиментационных оползней также присутствуют в разрезе и значительно отличаются по внешнему виду, единственным остающимся вариантом являются новейшие движения земной поверхности. Морфология собственно тектонических складок и дислокаций указывает на наиболее вероятную обстановку растяжения во время их формирования.

Западный берег Енисейского залива

Западный берег Енисейского залива от реки Сосновки до реки Омудево (рис. 1) характеризуется довольно слабой геологической изученностью, при том, что разрез рыхлых отложений здесь представляет значительный интерес для понимания палеогеографических условий последних тысячелетий.

Терраса высотой 30 м обрывается к берегу клифом с уклонами до 70–80°. Наибольший интерес представляет разрез рыхлых отложений, вскрывающийся в уступе на протяжении 10 км, довольно яркий и необычный. Наблюдается переслаивание пачек желтых песков с сизыми глинами, с большим количеством щепок, древесины и растительного детрита (рис. 3).

Мощность пачек колеблется от 1 м до нескольких сантиметров и в целом уменьшается от краев к центру изученного обнажения.

Генезис самих отложений представляется нам морским, причем наблюдается ритмичная трансгрессивно-регрессивная последовательность, сформировавшаяся в результате значительных колебаний уровня моря. Волнисто-слоистые пески отвечают мелководной обстановке осадконакопления, глины и ритмиты – спокойной и глубоководной. Ветки и стволы деревьев, встречающиеся *in situ* в разрезе, по всей видимости, являются палеоплавником: они лишены листьев и коры и оглажены. В древесных и «щепочных» слоях полностью отсутствует торф и любые другие следы травянистой растительности. Ритмиты, залегающие в центре обнажения (точка 400), наиболее древние и отвечают глубоководной фации. В результате постепенного понижения уровня моря с наложенными колебаниями сверху начали накапливаться ритмично переслаивающиеся пески. Чем больше уровень моря понижался, тем мощнее становились прослои песка.

Изученная нами морская толща в значительно степени деформирована. На исследованном участке от реки Сосновки до реки Омудево наблюдается своеобразная пологая и широкая «антиклиналь» 10 км в поперечнике с ядром ленточных глин в центре и с наклонно залегающими переслаивающимися пачками песков, древесных остатков и глин на флангах. В рельефе эта так называемая антиклиналь выражена куполообразным поднятием (ядро антиклинали находится в центре поднятия (рис. 3)).

На крыльях антиклинали наблюдается «полосатое» переслаивание пачек ярко-желтых песков, сизых ритмитов (глин и алевроитов) и прослоев древесины, составляющих целые щепочные слои мощностью до десятков см (рис. 3б). Мощность таких ритмично повторяющихся пачек составляет от 0,4 до 1 м и постепенно уменьшается, от краев к центру, т.е. ближе к центру разреза антиклинали, переслаивание становится более частым, пока не переходит полностью в разрез ленточных ритмитов, вскрывающихся в ядре. На крыле, расположенном со стороны реки Монгочеяхи (Сосновая),

слои наклонены на запад; со стороны реки Омулевой наблюдается противоположное залегание с падением на восток. Ближе к центру (точки 397–401, рис. 3) прослой песка становятся все тоньше, пока весь обрыв не начинает состоять полностью из ленточных ритмов (точка 400).

Наблюдаемая антиклиналь осложнена многочисленными пологими складками, однако уклон их крыльев не превышает 5–10°. Тем не менее в 500 м от восточного края береговых обрывов близ реки Омулевой наблюдается единичная очень резкая дислокация, не наблюдавшаяся ранее нигде на всем протяжении обнажения (рис. 3а, точка 416): на участке не более 20 м слои резко загибаются вверх до вертикального залегания. В самой толще наблюдаются многочисленные трещины со смещением величиной до 8–10 см (рис. 3г).

По всей видимости, складка наблюдается в месте, где береговой обрыв сечется линеаментом — одним из разрывных нарушений или зоной повышенной трещиноватости, хорошо читающимся в рельефе, ось которого может проходить по термоэрозийному оврагу. Тем не менее в рельефе нарушение выражено неглубоким линейным понижением. Возможно, это связано с тем, что здесь наблюдается разлом сжатия, который не проявляется в виде столь обширных депрессий, как разломы растяжения. По всей вероятности, ось сжатия была направлена в направлении «запад–восток», что и создало условия для того, что слои были резко заброшены вверх и наклонены.

Полоса побережья от реки Сосновой до реки Омулевой относится к одному крупному макроблоку, отделенному от соседних линеаментами растяжения, по которым заложены долины этих рек. Сам крупный блок, в свою очередь, был рассечен небольшими разрывными нарушениями различной кинематики на блоки более мелкого порядка и испытал в новейшее время постепенное куполообразное поднятие с центром в 4,7 км к востоку от устья реки Сосновой, где на поверхность выходят наиболее древние ленточные глины. В процессе поднятия толща, находившаяся в месте более интенсивного воздымания, соответственно подвергалась более высоким темпам денудации, в результате чего, несмотря на значительную разницу в темпах вертикальных движений между краями и центром купола, рельеф сохранил свой равнинный облик.

В 40 км к востоку, в районе полярной станции Лескино, в клифах вскрывается по некоторым параметрам похожая сложно дислоцированная Лескинская толща. Работавшие там исследователи [Каплянская и др., 1986] предполагают, что складки в ней вызваны напорным действием шельфового ледника.

Нам представляется, что для изученного нами макроблока нарушения сплошности залегания пород вызваны скорее явлением линейной приразломной складчатости, чем гляциодислокациями. Такой вывод подтверждается, во-первых, тем, что складки часто характерны для мест, где берег секут линеаменты, выделяемые по топографическим картам и космическим снимкам, а также ориентировкой осей складок не в субширотном, как это было бы в случае напора ледника с шельфа, а в субмеридиональном направлении. Кроме того, ни ледниковые формы рельефа, как аккумулятивные, так и денудационные, ни моренные отложения в ближайших окрестностях обнажения не встречены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на обоих рассмотренных участках присутствуют новейшие дислокации различного генезиса: как экзогенного, так и эндогенного. Была проведена их классификация; рассмотрено время формирования. Для определения происхождения

и времени деформации новейших отложений необходимо детальное изучение стратиграфии района и подробное описание самого разреза; корреляция слоев с другими участками. Было определено, что для ленточных ритмитов ключевого участка на восточном побережье Байдарацкой губы характерны два вида дислокаций: собственно тектонические (с вероятным формированием в обстановке растяжения) и криогенные, а также промежуточные, подверженные влиянию обоих факторов. На формирование пологой антиклинали морской толщи на западном побережье Енисейского залива близ реки Сосновой в наибольшей степени повлияло куполообразное поднятие территории, а также блоковые движения вдоль линеаментов с предположительно преобладающим механизмом сжатия.

Авторы выражают благодарность начальнику экспедиции «Ямал–Арктика-2012» В.А.Оношко, команде НИС «Профессор Молчанов» и отдельную благодарность команде технического обеспечения: водителям моторных лодок «Scandic» А.Яковлеву и А.Журову, водителю моторной лодки «Zodiac» Е.Мартынову, водителям вездеходов П.Тарасову, Д.Шестакову и О.Бусыгину за их самоотверженную работу в любое время суток в любых погодных условиях, которая стала одним из самых необходимых условий для успеха экспедиции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авенариус И.Г. Морфоструктура Беломорского региона // Геоморфология. 2004. № 3. С. 48–56.
- Архипов С.А. Объяснительная записка к региональной стратиграфической схеме Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1990. 95 с.
- Астафьев Д.А., Скоробогатов В.А. Тектонический контроль газонефтеносности полуострова Ямал // Геология нефти и газа. 2006. № 2. С. 20–29.
- Астахов В.И. Главные рубежи позднего плейстоцена Урало-Сибирской Арктики: фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований // Материалы VI Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. Новосибирск, 2009. С. 50–52.
- Астахов В.И. Позднеплейстоценовая обстановка осадконакопления в центре Западной Сибири // Труды ИГиГ СО АН СССР. 1989. Т. 657. С. 118–126.
- Астахов В.И., Мангеруд Я., Свенсен Й.-И. Трансуральская корреляция верхнего плейстоцена Севера // Региональная геология и металлогения. 2007. № 30–31. С. 190–206.
- Ашик И.М., Макаров А.С., Большиханов Д.Ю. Развитие берегов Российской Арктики в связи с колебаниями уровня моря // Метеоспектр. 2010. № 2. С. 23–27.
- Герман Е.В., Кисляков В.Н., Рейнин И.В. Геология и геоморфология п-ва Ямал – нового района перспективного для поисков нефти и газа // Геология и нефтегазоносность севера Западной Сибири. Труды ВНИГРИ. 1963. Вып. 225. С. 311–329.
- Данилов И.Д. Плейстоценовые трансгрессии на севере Западной Сибири и в Печорской низменности. Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое. Л.: Гидрометеиздат, 1970. С. 368–373.
- Каневский М.З., Стрелецкая И.Д., Васильев А.А. Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений Западного Ямала (на примере района Марре-Сале) // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 3. С. 16–27.
- Каплянская Ф.А., Никольская М.В., Тарноградский В.Д. Доледниковые морские отложения на севере Западной Сибири (Лескинская толща) // Кайнозой шельфа и островов Советской Арктики. Л.: ПГО «Севморгеология», 1986. С. 100–109.
- Ласточкин А.Н. Тектонические движения, структуры и морфоструктуры платформенных равнин // Геоморфология. 1976. № 3. С. 15–25.

Романенко Ф.А., Белова Н.Г., Николаев В.И., Олюнина О.С. Особенности строения рыхлых отложений Югорского побережья Байдарачьей губы Карского моря // Матер. V Всеросс. совещания по изучению четвертичного периода. М.: ГЕОС, 2007. С. 348–351.

Романенко Ф.А., Гаранкина Е.В., Шилова О.С. Роль тектонических движений в формировании рельефа и рыхлых отложений юго-западного побережья п-ова Ямал // Геология полярных областей Земли. Материалы XLII Тектонического совещания. 2009. Т. 2. С. 160–164.

Рычагов Г.И. Общая геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та; Наука, 2006. 416 с.

Стрелецкая И.Д., Каневский М.З., Васильев А.А. Пластовые льды в дислоцированных четвертичных отложениях Западного Ямала // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 2. С. 68–78.

Baranskaya A. The latest tectonic movements in key areas on the coasts and islands of the Laptev sea//«Geomorphology and Palaeogeography of Polar Regions» // Proceedings of the Joint Conference «Geomorphology and Palaeogeography of Polar Regions», Symposium «Leopoldina» and the INQUA Peribaltic Working group Workshop. Saint-Petersburg. SPSU. 9–12 September 2012. SPb. 2012. P. 342–345.

Forman S.L., Ingolfsson O., Gataullin V. et al. Late Quaternary stratigraphy, glacial limits, and paleoenvironments of the Marresale area, western Yamal Peninsula, Russia // Quaternary Research. 2002. Vol. 57. P. 355–370.

Mangerud J., Gosse J., Matiouchkov A., Dolvik T. Glaciers in the Polar Urals, Russia, were not much larger during the Last Global Glacial Maximum than today // Quaternary Science Reviews. 2008. Vol. 27. P. 1047–1057.

Thiede J. Quaternary Environments of the Eurasian North // Quaternary Science Reviews. 2004. Vol. 23. № 11–13. P. 1225–1512.

Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. Late Quaternary ice sheet history of Northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. 2004. Vol. 23. P. 1229–1272.

A.V.BARANSKAYA, D.Yu.BOLSHIYANOV, Yu.I.KUCHANOV, V.M.TOMASHUNAS

NEW DATA ON NEOTECTONIC MOVEMENTS AND DISLOCATIONS IN QUATERNARY SEDIMENTS OF THE YAMAL AND GYDAN PENINSULA BASED ON THE RESULTS OF THE «YAMAL–ARCTIC-2012» EXPEDITION

The results of fieldwork during the “Yamal–Arctic-2012” Expedition at two sites on the Kara Sea coast are presented. On these sites, deformations and plicative dislocations have been observed in the Quaternary sediments exposed along the sea cliffs. On the eastern coast of the Baydarata Bay, as well as in the south-western part of the Gulf of Enisey, folds of different shape, size and genesis have been documented. Their morphology is described, the probable mechanisms of their formation have been proposed. Purely tectonic dislocations, caused only by crustal movements and dynamic influence of faults and fractures, have been selected.

Keywords: Yamal, Gydan, geomorphology, neotectonics, Quaternary, dislocations.

ГОЛОЦЕНОВЫЕ МОРСКИЕ ТЕРРАСЫ ЮЖНЫХ ОСТРОВОВ ЗЕМЛИ ФРАНЦА-ИОСИФА

канд. геол.-минерал. наук Е.А.ГУСЕВ^{1,2}, д-р геогр. наук Д.Ю.БОЛЬШИЯНОВ^{2,3},
нач. морского отряда В.А.ДЫМОВ⁴, канд. геогр. наук В.В.ШАРИН⁴,
д-р геол.-минерал. наук Х.А.АРСЛАНОВ²

¹ – Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов мирового океана им. академика И.С.Грамберга, Санкт-Петербург, e-mail: gus-evgeny@yandex.ru

² – Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, e-mail: arslanovkh@mail.ru

³ – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: bolshiyarov@mail.ru

⁴ – Полярная морская геологоразведочная экспедиция, г. Ломоносов, e-mail: sharin_v@mail.ru

Радиоуглеродные датировки по морским террасам южных островов архипелага Земля Франца-Иосифа: Ламон и Вильчека – свидетельствуют об их недавнем неотектоническом поднятии. По о. Вильчека были получены более молодые датировки по уровням, анализированным ранее. Датировки свидетельствуют о трансгрессии моря и высоком его стоянии около 2000 лет назад на южных островах архипелага Земля Франца-Иосифа.

Ключевые слова: Земля Франца-Иосифа, морские террасы, радиоуглеродные датировки, неотектоника.

ВВЕДЕНИЕ

Поднятые над уровнем моря четвертичные морские террасы довольно широко распространены на арктических островах. Эти образования отмечались уже первыми исследователями Арктики и к настоящему времени с той или иной степенью изучены на всех архипелагах. Земля Франца-Иосифа является наиболее труднодоступным из арктических архипелагов и занимает самое северное положение в Восточном полушарии. В отличие от Новой Земли, Шпицбергена и Северной Земли, на Земле Франца-Иосифа известны в основном голоценовые морские террасы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе высокоширотной экспедиции «Арктика-2007», проводившейся в рамках программы Международного полярного года, с борта НЭС «Академик Федоров», осуществлялись авиадесантные геологические наблюдения на островах Земли Франца-Иосифа [Ашик, Соколов, 2008; Гусев и др., 2008]. Были посещены северные, а также южные острова архипелага – Ламон и Вильчека (рис. 1). Кроме того, о. Вильчека был обследован сотрудниками Северной геологосъемочной партии Полярной морской геологоразведочной экспедиции (ПМГРЭ) в 2007 г. В статье представлены результаты геоморфологических наблюдений, а также радиоуглеродные датировки по раковинам моллюсков, древесине и костям кита из отложений морских террас (табл. 1).

Остров Вильчека расположен в 12 км к северу от острова Ламон. Он имеет форму, напоминающую берцовую кость длиной до 11 км и шириной на юго-восточных и северо-западных краях до 4–10 км, тогда как срединный перешеек не превышает в ширину 2–3 км. Пассивный ледниковый купол, покрывающий большую часть острова, распался в ходе таяния на два малых купола, высвободив почти целиком срединный перешеек. В настоящее время он представляет собой выровненную поверхность, сложенную песком с отдельно стоящими скальными останцами базальтов. В 2007 г. наблюдения были выполнены на освободившемся перешейке – у подножия коренного базальтового останца с абс. отм. 51 (т.н. 0702). На дне небольшого цирка, обращенного к югу, на высоте примерно 25–30 м обнаружены вытянутые гряды береговых валов на морской террасе (рис. 2). Обращает на себя внимание хорошая сохранность аккумулятивных морских форм после стаивания перекрывавшего их ледника. В песчаном материале, слагающем эти гряды, обнаружена плавниковая древесина, которая была датирована радиоуглеродным методом. Полученные радиоуглеродные датировки охватывают возрастной интервал от 1,8 до 2,77 тыс. лет назад.

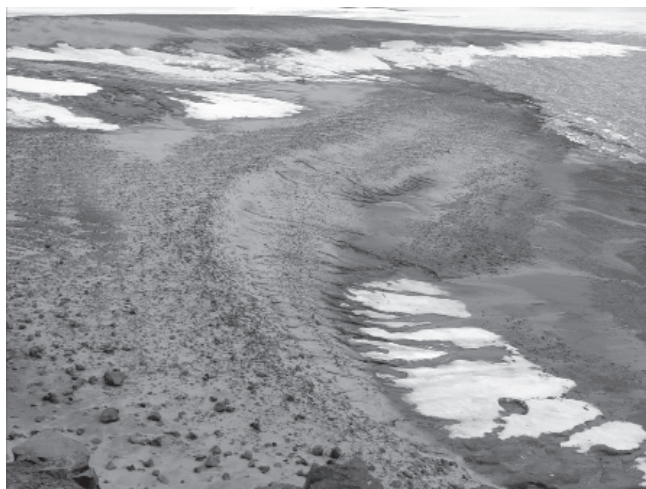


Рис. 2. Береговые валы морской террасы на о. Вильчека.

К северо-востоку от т.н. 0702, на восточном берегу о. Вильчека, сотрудниками ПМГРЭ описана серия обнажений и расчисток, которые сведены в единый разрез, вскрывающий отложения на высотных отметках от 0 до 60 м над уровнем моря (т.н. 1253). Литологически осадки представлены песками, с прослоями галечников, реже – супесей и глин (рис. 3). На многих высотных уровнях в отложениях встречаются раковины морских моллюсков. Полученные по раковинам радиоуглеродные датировки не выявляют какой-либо дифференциации по высотным отметкам. Все даты укладываются в возрастной интервал от 6 до 9 тыс. радиоуглеродных лет (табл. 1). По всей видимости, исследованные осадки являются отложениями подводного берегового склона, формировались одновременно по всему высотному (глубинному) интервалу в атлантическую стадию голоцена. Береговые валы субатлантической стадии голоцена в т.н. 0702 фиксируются на уровнях 25–30 м. Похожую радиоуглеродную датировку (около 2600 ± 170) по о. Вильчека ранее получил С.Л.Форман с соавторами [Forman et al., 2004].



Рис. 3. Разрез голоценовых отложений на о. Вильчека в т.н. 1253. Слева от литологической колонки показаны радиоуглеродные датировки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют об очень молодом возрасте современного оледенения островов архипелага. Приморские равнины и низкие острова, появившиеся над уровнем моря от 8 до 2 тыс. лет назад, постепенно покрывались ледниковыми куполами и шапками. Скорость и величина воздымания архипелага Земля Франца-Иосифа превышала скорость голоценовой трансгрессии, поэтому на островах повсеместно наблюдаются голоценовые морские террасы. Интересно, что террасы, соответствующие начальному этапу трансгрессии, охарактеризованные радиоуглеродными датировками 8–10 тыс. лет назад, приурочены к современным отметкам от 0 до 30 м над уровнем моря. По материалу, отобранному выше 30 м, получены датировки, охватывающие временной интервал от 2 до 7 тыс. лет назад.

В связи с новыми радиоуглеродными датами по двум южным островам архипелага Земля Франца-Иосифа представляется слабо обоснованной модель гляциоизостатического поднятия данной территории [Forman et al., 2004]. Изобазы поднятия, проведенные этими авторами по датировкам морских террас на островах архипелага, не подтверждаются нашими новыми данными. По-видимому, на островах обнажаются не только осадки, отложившиеся в береговой зоне (пляж, береговые валы), но и аккумулятивные образования подводных береговых склонов. Поэтому никакого последовательного удревнения равновысотных морских осадков по направлению от предполагаемого Баренцевоморского центра оледенения не наблюдается. Разброс возрастных оценок объясняется скорее дифференцированными поднятиями территории архипелага. Причиной этого является блоковое строение района и неравномерность по площади и амплитуде неотектонического воздымания. Время начала неотектони-

ческой активизации Баренцевского шельфа определяется в 16 000 лет [Крапивнер, 2006, 2007]. По нашим данным, для Земли Франца-Иосифа наибольшие амплитуды вертикальных движений фиксируются для последних 2 тысяч лет, что также противоречит модели деградации региона.

Критические замечания относительно гляциоизостатической природы поднятия островов Земли Франца-Иосифа высказывались и ранее [Большаинов, 2006; Большаинов и др., 2009]. Для решения этой проблемы необходимы дальнейшие исследования как островов архипелага, так и прилегающего шельфа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиоуглеродные датировки, полученные по морским террасам южных островов архипелага, дополняют результаты предшественников [Дибнер, 1961; Гросвальд и др., 1961; Ковалева и др., 1974; Дымов, Шарин, 2004; Большаинов и др., 2009]. По о. Вильчека были получены более молодые датировки по уровням, анализированным ранее [Forman et al., 2004].

Наши данные подтверждают модель наступления в Баренцевском регионе голоценовой трансгрессии [Крапивнер, 2006], согласно которой затопление структурно обусловленных поднятий произошло позже, чем это проявилось во впадинах. При этом некоторые воздымающиеся блоки обгоняли скорость подъема уровня моря, в результате чего образовались архипелаги островов. Интенсивность вертикальных неотектонических движений противоположного знака, очевидно, объясняет аномальную глубину впадин Баренцевского шельфа и ярко выраженную контрастность подводного и надводного рельефа. Столь значительный градиент амплитуд вертикальных тектонических движений не характерен для континентальных окраин пассивного типа и является отличительной особенностью Баренцевского шельфа.

Кроме того, новые данные также свидетельствуют о трансгрессии моря и высоком его стоянии около 2000 лет назад на островах архипелага Земля Франца-Иосифа, как это замечено и для других арктических побережий [Большаинов, 2006; Шарин и др., 2007; Шарин, Арсланов, 2011; Гусев и др., 2012 и др.]. Таким образом, современные ледники Земли Франца-Иосифа, а также, возможно, и других арктических архипелагов имеют сравнительно молодой возраст, а не являются остатками от гипотетического Баренцевского ледникового щита, покрывавшего весь шельф, как считают некоторые исследователи.

Авторы приносят глубокую благодарность С.Б.Чернову, Ф.Е.Максимову, А.Л.Макарову и А.А.Стариковой за проведение работ по радиоуглеродному датированию образцов.

Работы по датированию органических остатков и вмещающих их отложений были частично профинансированы по Гранту Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах № 11.G34.31.0025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ашик И.М., Соколов В.Т. Основные итоги и предварительные результаты экспедиции «Арктика-2007» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 3 (80). С. 72–85.
- Большаинов Д.Ю. Пассивное оледенение Арктики и Антарктики. СПб.: ААНИИ, 2006. 296 с.
- Большаинов Д.Ю., Погодина И.А., Гусев Е.А., Шарин В.В., Алексеев В.В., Дымов В.А., Анохин В.М., Аникина Н.Ю., Деревянко Л.Г. Новые данные по береговым линиям архипелагов Земля Франца-Иосифа, Новая Земля и Шпицберген // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 2 (82). С. 68–77.

Гросвальд М.Г., Девириц А.Л., Добкина Э.И. К истории голоцена Земли Франца-Иосифа // Доклады АН СССР. 1961. Т. 141. № 5. С. 1175–1178.

Гусев Е.А., Лайба А.А., Литвиненко И.В., Дымов В.А., Строганов Н.А., Баженова Е.А. Геологические исследования в рейсе НЭС «Академик Федоров» в июле–августе 2007 года // Экспедиционные исследования ВНИИОкеангеология в 2007 году: Ежегодный обзор. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2008. С. 31–43.

Гусев Е.А., Шарин В.В., Дымов В.А., Качурина Н.В., Арсланов Х.А. Новые данные о строении верхних горизонтов осадочного чехла северной части Карского шельфа // Разведка и охрана недр. 2012. № 8. С. 87–90.

Дибнер В.Д. Новые данные по палеогеографии антропогена Земли Франца-Иосифа в свете первых результатов радиоуглеродных исследований // Доклады АН СССР. 1961. Т. 138. № 4. С. 893–894.

Дымов В.А., Шарин В.В. Новые данные по палеогеографии голоцена архипелага Земля Франца-Иосифа (о. Карла-Александра) // Арктика и Антарктика. 2005. Вып. 4 (38). С. 53–56.

Ковалева Г.А., Голубков В.С., Гусев Б.В. Современные движения острова Земля Александры (архипелаг Земля Франца-Иосифа) // Геотектонические предпосылки к поискам полезных ископаемых на шельфе Северного Ледовитого океана. Л.: Изд-во НИИГА, 1974. С. 87–92.

Крапивнер Р.Б. Быстрое погружение Баренцевского шельфа за последние 15–16 тысяч лет // Геотектоника. 2006. № 3. С. 39–51.

Крапивнер Р.Б. Признаки неотектонической активности Баренцевоморского шельфа // Геотектоника. 2007. № 2. С. 73–89.

Шарин В.В., Алексеев В.В., Дымов В.А., Погодина И.А., Большиянов Д.Ю., Гусев Е.А. Новые данные по позднечетвертичной стратиграфии и палеогеографии района Вейде-фьорда (Западный Шпицберген) // ДАН. 2007. Т. 412. № 6. С. 822–824.

Шарин В.В., Арсланов Х.А. Новые радиоуглеродные датировки морских террас Северо-Восточной Земли (Архипелаг Шпицберген) // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2011. Вып. 2. С. 129–134.

Forman S.L., Lubinski D.J., Ingolfsson J., Zeeberg J.J., Snyder J.A., Siegert M.J., Matishov G.G. A review of postglacial emergence on Svalbard, Franz Josef Land and Novaya Zemlya, northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. 2004. № 21. P. 1391–1434

E.A.GUSEV, D.Yu.BOLSHIYANOV, V.A.DYMOV, V.V.SHARIN, Kh.A.ARSLANOV

HOLOCENE MARINE TERRACES OF FRANZ JOSEF LAND SOUTHERN ISLANDS

Radiocarbon dating of marine terraces on the southern islands of Franz Josef Land archipelago: Lamon and Wilczek indicate recently neotectonic uplift. We obtained younger radiocarbon dates from Wilczek island than it was analyzed previously. The dating show transgression of the sea and its high standing about 2000 years ago in the southern islands of the archipelago of Franz Josef Land.

Keywords: Franz Josef Land, marine terraces, radiocarbon dates, neotectonics.

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

УДК 913+94

Поступила 19 августа 2013 г.

ОТКРЫТИЮ АРХИПЕЛАГА СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ – 100 ЛЕТ:
ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАУЧНЫХ РАБОТ

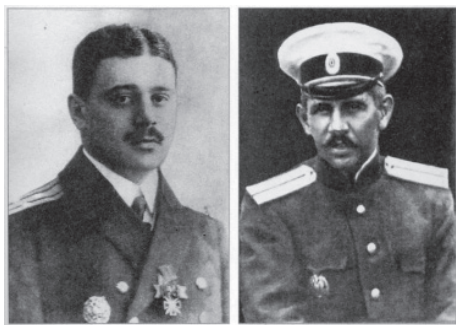
д-р геогр. наук Л.М.САВАТЮГИН, канд. геогр. наук И.Н.СОКРАТОВА

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: savat@mail.ru

3 сентября 2013 г. исполняется 100 лет со дня открытия арктического архипелага Северная Земля – последнего и самого крупного географического открытия XX века на нашей планете.

Архипелаг был обнаружен 21 августа (по старому стилю) 1913 г. Гидрографической экспедицией Северного Ледовитого океана (ГЭСЛО) на ледокольных транспортах «Таймыр» и «Вайгач» под командованием капитана 2-го ранга Б.А.Вилькицкого. «В 6 часов пополудни 22 августа, – писал в отчете о плавании 1913 г. Б.А.Вилькицкий, – я объявил собравшимся экипажам кораблей экспедиции о присоединении новооткрытой земли к владениям Его Императорского Величества и поздравил команду с открытием, после чего при криках “ура” на мачте был поднят националь-

ный флаг» [Вилькицкий, 1914]. 30 ноября 1913 г. во Владивостокской газете «Далекая окраина» (№ 2050) была помещена фотография участников ГЭСЛО и напечатано сообщение об открытии экспедицией к северу от Таймыра большого острова, названного участниками экспедиции Тайвай (по начальным слогам названия транспортов «Таймыр» и «Вайгач»). Однако по возвращении экспедиции в Петербург это название было признано «нелепым и поспешным». Приказом Морского министра № 14 от 23 января 1914 г. в соответствии с Высочайшим повелением Государя Императора от 19 января 1914 г. вновь открытая суша была названа Земля Императора Николая II: «Государь Император Высочайше повелеть соизволил: присвоить земле, расположенной к северу от мыса Челюскин



Слева – командир л/п «Таймыр» Б.А.Вилькицкий, справа – командир л/п «Вайгач» П.А.Новопашенный.



Транспорты «Таймыр» и «Вайгач». Худ. Е.В.Войшвилло.

наименование: “Земля Императора Николая II”; острову, лежащему к северу от того же мыса, — “Остров Цесаревича Алексея” и островку к юго-востоку от острова Беннета — “Остров Генерала Вилькицкого”» [Старокадомский, 1915].

После Октябрьской Революции неоднократно обсуждались на разных уровнях планы «безотлагательного и всестороннего изучения» этой вновь открытой суши в Арктике, в том числе и предложения целого ряда иностранных исследователей: это было время попыток иностранных держав присвоить арктические острова. Поступало много предложений о переименовании архипелага, контуры и площадь которого к тому времени еще не были определены. Современное название «Северная Земля» было утверждено постановлением Президиума ЦИК СССР от 11 января 1926 г. Архипелаг с новым названием впервые был обозначен на карте Северного Ледовитого океана, выпущенной в 1928 г., что закрепило его принадлежность Российской Федерации.

Свои современные географические контуры архипелаг стал приобретать, в первую очередь, благодаря поистине героической Североземельской экспедиции 1930–1932 гг., организованной Институтом по изучению Севера, как в то время назывался Арктический и антарктический научно-ис-

следовательский институт (ААНИИ). В полевом составе этой экспедиции было всего четыре человека: начальник, заместитель директора Института по изучению Севера Г.А.Ушаков, научный руководитель работ, геолог-геодезист Н.Н.Урванцев, радист В.В.Ходов и каюр-охотник С.П.Журавлев. Высадившись с ледокольного парохода «Георгий Седов» в августе 1930 г. на острове Домашний, эта группа полярников за два года, проведенных на архипелаге, прошла около семи тысяч километров пешком и на трех собачьих упряжках, закартировала порядка 37 тысяч квадратных километров «нехоженой земли», выяснила ее простираение и конфигурацию, описала животный и растительный мир, характер ледового режима окружающих морей. Были организованы метеорологические наблюдения; проведены геологические и тектонические исследования. На основании маршрутной съемки Н.Н.Урванцев составил топографические карты Северной Земли в стереографической и меркаторской проекциях. Появилась первая геологическая карта Северной Земли. В ходе работ было доказано, что Северная Земля состоит из четырех крупных островов (Октябрьской Революции, Большевик, Комсомолец, Пионер) и ряда мелких [Урванцев, 1935; Ушаков, 2001].



Слева направо: геолог-геодезист Н.Н.Урванцев, начальник экспедиции Г.А.Ушаков, каюр-охотник С.П.Журавлев, радист В.В.Ходов на о. Домашний, 1930 г.

Эти главные исторические достижения в изучении архипелага были впоследствии дополнены результатами многочисленных арктических экспедиций, каждая из которых также могла бы быть отнесена к разряду героических из-за суровой специфики работы в высокоширотной Арктике. В память о них существует самый северный музей в России, созданный сотрудниками ААНИИ и коллективом объединения «Полярные трассы»: музей истории и освоения архипелага Северная Земля. Он расположен в «домике Ушакова», который до середины 90-х годов прошлого века стоял на острове Домашний, а потом был перенесен к погранзащите на остров Средний.

В морских экспедициях 1930–1950 гг. на ледокольных пароходах «Георгий Седов», «Александр Сибиряков», «Владимир Русанов», «Таймыр», «Челюскин», «Садко», «Моссовет», «Ермак», «Мурманец», «Академик Шокальский», «Капитан Белосусов», «Литке», «Владимир Ильич» были выполнены гидрографические и гидрологические работы, метеорологические и ледовые наблюдения в окружающих архипелаг морях, проливах и заливах [Белов, 1959].

Поистине героическую работу выполняли и летчики полярной авиации на самолетах Н-2, Р-5 и У-2, обеспечивая

оперативную ледовую разведку в районах плавания судов и снабжение экспедиций.

Океанологические, топографические, картографические экспедиции в конце сороковых годов XX века стали дополняться геологическими и геоморфологическими съемками островов архипелага. Так, в результате работ экспедиции НИИ геологии Арктики в 1948–1951 гг. были составлены геологическая и геоморфологическая карты Северной Земли.

В 1948–1951 гг. экспедициями ААНИИ были выполнены снегомерные и гляциологические наблюдения, собраны ботанические и зоологические коллекции, образцы почв и четвертичных отложений. Тогда же начали работу метеостанции на Краснофлотских островах и острове Большевик. Организованная еще Г.А. Ушаковым и Н.Н. Урванцевым метеостанция с острова Домашний была перенесена на Голомянный, где работает и поныне. В 2010 г. полярная станция «Остров Голомянный» получила новое наименование «Морская гидрометеорологическая береговая станция (МГ-2) Голомянный».

В 1952 г. была произведена повторная аэрофотосъемка архипелага для построения его крупномасштабных карт; эти аэрофотоснимки и сейчас используются



«Домик Ушакова» на о. Средний.
Фото Л.М.Саватюгина.

для сравнительных географических исследований [Саватюгин, Дорожкина, 2010].

В результате работ аэрофотосъемочной экспедиции треста «Арктикразведка» Горно-геологического управления ГУСМП в 1952–1953 гг. были уточнены контуры больших и малых островов, границы ледников и составлены современные карты архипелага Северная Земля.

С 1957 г. на Северной Земле работала многолетняя зимовочная экспедиция Гидрографического предприятия Министерства морского флота по широкой программе гидрологических и гидрографических исследований архипелага.

В результате поисковых и разведочных работ производственным объединением «Севморгеология» в 1970–1980 гг. были созданы геологические и геоморфологические карты архипелага масштаба 1:200 000.

Огромный объем исследований был выполнен на Северной Земле в ходе многолетних экспедиционных работ ААНИИ, которые начались в 1962 г. под руководством Л.С.Говорухи [Говоруха, 1981]. В 1968 и 1969 гг. здесь был впервые использован метод радиолокационного зондирования для изучения ледников евразийского сектора Арктики, позволивший определить гляциологические зоны архипелага и их высотное положение. С помощью снегомерных полигонов и бурения глубоких скважин с отбором ледяного керна были измерены скорости движения льда, определены температурный режим и структура ледников, характер ледообразования, что послужило основой создания Каталога ледников Северной Земли [Саватюгин, Шевнина, 2003]. Организованный в 1974 г. гляциологический стационар ААНИИ «Купол Вавилова» стал испытательным полигоном для разработки и внедрения в практику гляциологических исследований новых методов и аппаратуры, в том числе термобуровых и электро-механических снарядов для проходки скважин в холодных арктических и антарктических ледниках [Говоруха, 1981].

Восстанавливать природные условия прошлого Северной Земли позволили гео-

морфологические и палеогеографические исследования [Большаинов, Макеев, 1995].

С 1989 г. исследования Северной Земли стали носить эпизодический характер – в это время в Российской Арктике было закрыто почти 90 % полярных станций. С 1993 по 2003 г. в эпизодических исследованиях архипелага Северная Земля в международных экспедициях участвовали специалисты из России, Канады, Японии, Англии, Германии, Швеции, Дании и США.

Следует отметить огромную значимость главной базы Северной Земли – аэропорта «Средний», который называли столицей Центральной Арктики. Его снежно-грунтовая взлетно-посадочная полоса в течение десятилетий являлась отправной точкой для многих масштабных высокоширотных экспедиций (ВШЭ) в Северном Ледовитом океане, проводимых Главным управлением навигации и океанографии ВМФ, Высокоширотной арктической экспедицией ААНИИ, другими организациями, исследующими Арктику. Огромный объем авиационных работ с Северной Земли обеспечивало Красноярское управление гражданской авиации и его легендарное подразделение на острове Диксон – Диксонская объединенная авиаэскадрилья (ДАОЭ), имевшая 15 экипажей высококлассных полярных летчиков, работающих на вертолетах Ми-8 и Ми-8 МТВ по всему пространству западного сектора Российской Арктики.

Мыс Арктический на острове Комсомолец в начале 1990-х гг. стал стартовой площадкой для многих международных лыжных и научно-спортивных экспедиций к Северному полюсу.

Не менее значимыми были в тот период различные экспедиционные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, выполнявшиеся рядом отраслевых предприятий и институтов на базах-полигонах ААНИИ: по натурному моделированию крупных гидротехнических сооружений из морского льда для разведки и добычи газа и нефти на шельфе арктических морей, для

защиты гидротехнических сооружений от внешних воздействий (подвижки льдов, обледенения и др.), по активным и пассивным методам разрушения льда (бурение и термическая резка морских и пресноводных льдов, ледников и айсбергов), по натурным испытаниям технических средств и конструкций, различных материалов и технологий в экстремальных арктических условиях.

В 1986 г. на мысе Баранова острова Большевик была создана научно-исследовательская полевая стационарная база ААНИИ для выполнения долговременных многоцелевых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в высокоширотной Арктике. С 1992 по 1996 г. здесь работала самая крупная на Северной Земле научно-экспедиционная база ААНИИ «ПРИМА», однако 26 августа 1996 г. из-за экономической нестабильности в стране она была законсервирована.

Сейчас российские исследователи вернулись на мыс Баранова, чтобы дать станции новую жизнь и превратить ее в современный научно-учебный центр – гидрометеорологическую обсерваторию. В июне 2013 г. на атомном ледоходе «Ямал» на мыс Баранова была доставлена экспедиция из семи человек и необходимое оборудование для того, чтобы расконсервировать ледовую базу. В настоящее время работы по вводу в строй объектов ледовой базы продолжаются. В дальнейшем здесь планируется развернуть в круглогодичном режиме комплекс исследований в области морского ледяного покрова, метеорологии, аэрологии, специальных атмосферных исследований, океанографии. Возрождение базы «Мыс Баранова» на Северной Земле становится очередным шагом России по возвращению в Арктику – зону наших национальных экономических, научных и оборонных интересов.



База «ПРИМА» на мысе Баранова. 2001 г.
Фото В.В.Баранова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов М.И.* Советское арктическое мореплавание. История исследования и освоения Северного морского пути. Т. 3. Л.: Морской транспорт, 1959. 510 с.
- Большаинов Д.Ю., Макеев В.М.* Архипелаг Северная Земля – оледенение, история развития природной среды. СПб.: Гидрометеиздат, 1995. 217 с.
- Вилькицкий Б.А.* Последнее плавание и открытия экспедиции Ледовитого океана (Открытие Земли Императора Николая II) // Армия и флот. 1914. № 10. С. 19–29.
- Говоруха Л.С.* Исследования Североземельского гляциологического стационара // Исследования ледникового покрова и перигляциала Северной Земли (Труды ААНИИ). 1981. Т. 367. С. 5–8.
- Саватюгин Л.М., Дорожкина М.В.* Архипелаг Северная Земля: история, имена и названия. СПб.: Наука, 2010. 200 с.
- Саватюгин Л.М., Шевнина Е.В.* Северная Земля: 90 лет после открытия // Природа. 2003. № 11. С. 56–65.
- Старокадомский Л.М.* Открытие новых земель в Северном Ледовитом океане. Петроград: Книжный склад Морского ведомства. Главное Адмиралтейство, 1915. 72 с.
- Урванцев Н.Н.* Два года на Северной Земле. Л.: Изд-во Главсевморпути, 1935. 364 с.
- Ушаков Г.А.* Остров метелей. По нехоженой земле. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 598 с.

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П.А.ГОРДИЕНКО

Как быстро летит время. Иногда задумываешься – может быть, это только для тебя. Но нет. Общаясь с коллегами, выясняешь, что и они так же думают.

Прошло 30 лет с того дня, как ушел из жизни Павел Афанасьевич Гордиенко. За это время не стало страны, в которой он учился, работал, делал научные открытия и был очень нужным человеком для полярников, моряков, летчиков и многих других, работавших на необъятных просторах Арктики.

Возможно, молодые ученые Арктического и антарктического научно-исследовательского института и, может быть, еще нескольких научных учреждений могут что-то сказать о ПАГ (так в кругах полярников звали Павла Афанасьевича). Но, к сожалению, молодые моряки, даже капитаны судов, работающие в настоящее время в Арктике, вряд ли что-то о нем вспомнят.

Вполне возможно, что кто-то из них вспомнит Михаила Михайловича Сомова, Александра Федоровича Трёшникова и Евгения Ивановича Толстикова – все-таки они были Героями своей страны.

Гордиенко не был Героем Советского Союза, но он, так же, как названные выше, был одним из первооткрывателей и исследователей Арктики.

Павел Афанасьевич Гордиенко принадлежал к замечательной плеяде талантливых ученых-полярников. Он не был кабинетным ученым, анализирующим поступающие к нему сведения. Это был новатор, соединяющий теорию и практику, неутомимый пропагандист научных знаний, создатель новых методик и подходов к изучаемым проблемам, один из основоположников арктической науки.

Я не был знаком с Павлом Афанасьевичем лично в течение продолжительного времени. Правда, мне неоднократно приходилось слышать о нем, работая на судах Мурманского морского пароходства и выполняя ежегодно снабженческие рейсы в западном районе Арктики и позднее, когда я уже работал в Штабе моропераций на Диксоне.

Сейчас трудно вспомнить, на борту какого судна, стоявшего в порту Монреаля, произошла запомнившаяся мне встреча с капитаном Александром Ивановичем Ветровым. Сидя у него в каюте, мы, закончив решение всех деловых вопросов, связанных с погрузкой судна, за чашкой чая перешли к воспоминаниям и случаям «из жизни». Вот тогда-то Александр Иванович, рассказывая о своих плаваниях на дизель-электроходе «Лена» в

Антарктиду, как-то неожиданно произнес фамилию Гордиенко, который в том рейсе был руководителем морского отряда, располагавшегося на дизель-электроходе. Много добрых слов было сказано в тот вечер о Павле Афанасьевиче. Тогда же мы вспомнили и о его работе на ледоколах в восточном районе Арктики в составе научно-оперативной группы Арктического института, о дрейфе на СП-4 и о многом другом. Вспомнили и написанную Гордиенко книгу «Ледовая авиационная разведка», в которой уже в те годы были изложены основные методы производства авиационной ледовой разведки. Ветров довольно много рассказывал мне о Гордиенко, ведь проведя с ним на борту одного судна многие недели и имея возможность подолгу беседовать, он достаточно хорошо узнал этого человека.

Мое личное знакомство с Павлом Афанасьевичем состоялось в 1972 г., когда я, вернувшись из командировки в Канаду, стал работать в Москве, в Администрации Северного морского пути. Первое впечатление: ты встретил большого полноватого человека с удивительно добрыми глазами и какой-то благожелательной улыбкой. Рукопожатие его было настоящее, мужское, чувствовалось, что эта рука может держать не только карандаш, но и лопату, и кирку. К нему можно было обращаться с любым вопросом и любой просьбой. И даже если вопрос казался ему немного странным, он не отмахивался, а пытался очень доходчиво объяснить ту или иную ситуацию и очень тактично указать на твою ошибку.

Работая главным государственным инспектором, а позднее – заместителем начальника АСМП, я по служебным делам довольно часто выезжал в Ленинград на всевозможные совещания, связанные с проведением арктических навигаций, обсуждением ледовых прогнозов, использованием ледовой авиаразведки и т.д. И, естественно, на всех этих совещаниях одним из самых ответственных и авторитетных лиц был Гордиенко – ведь он руководил отделом ледовых прогнозов ААНИИ. Заканчивалось совещание, утихали споры, участники начинали расходиться. Павел Афанасьевич приглашал группу коллег к себе домой. Почему-то по дороге мы заходили в полуподвальчик, являвшийся, как мы шутили, «настоящим завоеванием петроградского пролетариата», – там продавали 50 граммов водки с обязательным бутербродом. После принятия одной-двух таких обязательных порций начинались всевозможные воспоминания и рассказы, продолжавшиеся уже на квартире Гордиенко. Зачем мы заходили в полуподвальчик за пятьюдесятью граммами водки – трудно сказать. Наверное, тогда мы все еще были молодыми, а может быть, это была сложившаяся традиция.

Павел Афанасьевич Гордиенко был непосредственным участником всех ответственных операций в Арктике. Руководимый им коллектив принимал активное участие в обосновании маршрутов плавания атомоходов «Арктика» и «Сибирь» в высоких широтах. Недаром подпись Павла Александровича с датой 26 февраля 1976 г. стоит под первым документом, связанным с походом атомного ледокола «Арктика» на Северный полюс: «Предварительная проработка вопроса о возможности опытного плавания мощного ледокола в район Северного полюса». Им же 2 августа 1977 г. подписан и другой столь же важный документ – «Расчет затрат времени на плавание экспедиции А-77 (поход атомного ледокола “Арктика” на Северный полюс)».

Павел Александрович был участником более 50 полярных экспедиций, разработчиком научных методов ведения ледовой авиаразведки, составления ледовых и гидрологических прогнозов. Он – океанолог, полярный исследователь, доктор географических наук, профессор, заслуженный деятель науки РСФСР.

Будучи по натуре оптимистом и очень энергичным человеком, Павел Афанасьевич Гордиенко до последнего дня своей жизни был полон планов, задумок, идей и желаний. Он еще многое хотел сделать.

Очень хочется, чтобы имя Гордиенко не было забыто новыми поколениями арктических исследователей и моряков.

*Г.Д.Бурков, капитан дальнего плавания,
лауреат Государственной премии СССР, почетный полярник*

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ А.А.ГИРСА



Александр Александрович Гирс родился 18 августа 1913 г. в Белоруссии, в селе Заборье Витебской области. В 1939 г. окончил с отличием физический факультет Ленинградского государственного университета и по распределению был направлен на работу в Арктический научно-исследовательский институт. Вся деятельность Александра Александровича, протекавшая в стенах этого института, была направлена на решение одной из важнейших проблем гидрометеорологической науки – создание долгосрочных прогнозов погоды. Он прошел путь от младшего научного сотрудника до руководителя отдела.

В 1940 г. он поступил в аспирантуру АНИИ, которую окончил в 1943 г.

В годы Великой Отечественной войны А.А.Гирс работал летом и осенью 1941 г. на оборонных работах в Ленинграде. В 1943 г. был командирован в Арктику, где занимался научно-оперативным гидрометеорологическим обеспечением морских и воздушных операций на трассе Северного морского пути (СМП).

В эти годы основное внимание в исследованиях А.А.Гирса было обращено на изучение вертикальной структуры арктической атмосферы и решение ряда методических вопросов, связанных с производством и обработкой аэрологических наблюдений в условиях Арктики. Результаты этих исследований были обобщены в двух трудах, важных для работы специалистов на полярных станциях: «Вертикальная структура атмосферы в западном районе Советской Арктики и ее сезонные изменения» и «Руководство по производству и обработке аэрологических наблюдений на полярных станциях». За работы в военное время А.А.Гирс был награжден медалями: «За оборону Ленинграда», «За трудовое отличие», «За оборону Советского Заполярья» и «За победу над Германией».

В 1945 г. А.А.Гирс защитил кандидатскую диссертацию и стал заместителем начальника отдела долгосрочных метеорологических прогнозов АНИИ.

В 1949 г. А.А.Гирс защитил докторскую диссертацию на тему «Вертикальная структура, формирование и преобразование основных типов атмосферной циркуляции». Новым подходом в данном исследовании явился переход от изучения отдельных высотных гребней и ложбин и деформационных полей к изучению взаимодействия их в масштабах полушария. Анализ адвективно-динамических крупномасштабных процессов позволил

установить механизм формирования и преобразования основных типов процессов в системе общей циркуляции атмосферы и связанные с этими преобразованиями изменения режима погоды в северной полярной области.

За научную и педагогическую деятельность в 1951 г. талантливому ученому было присвоено ученое звание профессора.

После смерти Г.Я.Вангенгейма, создателя макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов, А.А.Гирс возглавил отдел долгосрочных метеорологических прогнозов ААНИИ (с 1956 по 1982 г.). А.А.Гирс направил исследования коллектива на дальнейшее совершенствование метода ДМП. Непосредственно им и под его руководством решены такие сложные задачи, как увеличение заблаговременности фонового метеорологического прогноза и скользящих сезонных уточнений, детализация месячного прогноза по естественным стадиям развития процессов, выявление и использование в прогнозах длительных климатических тенденций, установление наиболее вероятных (групповых) прогностических зависимостей и ряд других важных научных и прикладных задач метеорологии.

А.А.Гирс был уникальным специалистом, который, обладая хорошей теоретической подготовкой, прошел все этапы научно-оперативных работ непосредственно в Арктике. Фундаментальные знания, большой научный и оперативный опыт и природная интуиция позволили ему многие годы успешно разрабатывать и внедрять в практику научно обоснованные методы долгосрочных и сверхдолгосрочных метеорологических прогнозов в полярных областях на основе принципов макроциркуляционного метода.

Будучи крупным ученым, он внес большой вклад в решение ряда важнейших задач метеорологии и климата. Изучение внутривековых колебаний форм атмосферной циркуляции и причин, их вызывающих, позволили судить о возможных климатических условиях в Арктике в будущем. Для этих исследований были характерны глубокий физический анализ и обоснованность выводов при рассмотрении сложных атмосферных процессов различного пространственно-временного масштаба.

Много сил и энергии А.А.Гирс отдал воспитанию научного коллектива отдела долгосрочных метеорологических прогнозов. Он являлся продолжателем созданной Г.Я.Вангенгеймом научной школы в области крупномасштабных атмосферных процессов и долгосрочных метеорологических прогнозов для полярных районов Арктики и Антарктики. Его идеи и взгляды нашли широкое отражение в научной деятельности специалистов как отдела ДМП ААНИИ, так и других научно-исследовательских учреждений. Результаты многолетнего мониторинга циркуляции атмосферы, представленные в виде каталога индексов циркуляции по классификациям Вангенгейма – Гирса, охватывающего период с 1891 г. по настоящее время, находят широкое применение в исследованиях, проводимых в нашей стране и за рубежом.

Одаренность и широкая эрудиция, исключительная целеустремленность и трудолюбие позволили ему успешно сочетать исследовательскую, прогностическую работу в ААНИИ с педагогической деятельностью в Ленинградском гидрометеорологическом институте (ЛГМИ). За более чем 30 лет им воспитана плеяда специалистов не только для нашей страны, но и для ряда зарубежных стран. Под его научным руководством защищено более 10 кандидатских диссертаций.

За время своей научной и педагогической деятельности А.А.Гирс оставил большое творческое наследие в виде трех монографий, учебников, пособий (справочников, наставлений, руководств, обоснований), а также многочисленных публикаций в отечественных и зарубежных научных журналах. Это наследие не только дает возможность студентам овладевать основами науки, но является востребованным многими специалистами-метеорологами.

А.А.Гирс, занимаясь научной и педагогической деятельностью, находил время для общественной работы. Многие годы он являлся членом Ученого совета ААНИИ, ЛГМИ и других учреждений. Много лет А.А.Гирс был председателем Ленинградского отделения Общества дружбы СССР – Норвегия. Он достойно представлял отечественную науку на международных форумах ученых в Швейцарии, Норвегии, США, Японии, Австралии и других странах.

Государство высоко оценило заслуги А.А.Гирса в мирное время. Ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки РСФСР». Он награжден орденом Трудового Красного Знамени, двумя орденами «Знак Почета», медалью «За трудовую доблесть», знаками «Почетный полярник», «Отличник Гидрометслужбы СССР». В общении А.А.Гирсу были свойственны высокая порядочность, а также требовательность к себе и коллегам, сочетавшаяся с большой доброжелательностью к окружающим.

Скончался А.А.Гирс 30 апреля 1983 г. Он прожил плодотворную творческую жизнь и внес значительный вклад в метеорологическую науку и в решение проблемы долгосрочных метеорологических прогнозов. Для многих его последователей Александр Александрович был и остается любимым учителем и мудрым наставником, сумевшим подвести их к вершинам профессионального мастерства.

В.В.Иванов, зав. лабораторией ДМП ААНИИ

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

1. Объем статьи не должен превышать 15 страниц текста в формате Microsoft Word с полуторным интервалом, включая список литературы, таблицы и рисунки.
2. Статьи должны быть представлены в распечатанном виде и переданы в электронном формате на CD или flash-накопителе (только при личной явке автора) в соответствии с нижеприведенными требованиями. Допускается пересылка файлов со статьей по электронной почте.
3. В комплект статьи, присылаемой автором, должны входить:
 - основной текст статьи на русском языке (включает в себя подрисовочные подписи и библиографический список);
 - иллюстративный материал в виде отдельных файлов любого из графических форматов в соответствии с нижеприведенными требованиями;
 - текст аннотации на русском и английском языках;
 - ключевые слова на русском и английском языках;
 - название статьи, инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках;
 - сведения об авторах (ученая степень, должность, название организации и ее полный почтовый адрес, электронная почта и телефон (в статье не публикуется)) только на русском языке; УДК статьи;
 - акт экспертизы и сопроводительное письмо, подписанное руководителем организации или учреждения, где работает автор (авторы), или самим автором (авторами).
4. *Требования к представляемому текстовым файлам.*

Текст должен быть представлен в формате Word. При подготовке текста необходимо использовать стандартный шрифт Times New Roman 12 пт., для набора греческих и некоторых специальных символов использовать шрифт Symbol.

Дробные части чисел отделяются от целых ЗАПЯТОЙ, а не точкой.

Не допускается:

 - использование цифры 0 и буквы О в надстрочном написании в качестве символа градуса;
 - символа «-» (дефис) вместо «—» (тире);
 - использование символа «х» вместо символа «Х»;
 - использование символов N, O, S, W в качестве указания широты и долготы как в текстах, так и на картах;
 - использование неразрывного пробела.

В качестве внешних кавычек используется пара «». При необходимости использования внутренних кавычек набираются кавычки “”.
5. *Требования к таблицам.*

Таблицы должны быть подготовлены в Microsoft Word шрифтом Times New Roman (при необходимости Symbol) 9 пт.

В каждой ячейке таблицы НЕ ДОЛЖНО БЫТЬ более одного абзаца.

При подготовке таблиц следует помнить, что максимальная ширина таблицы в книжной ориентации – 125 мм, в альбомной – 195 мм.

Таблицы оформляются разделительными линиями толщиной 0,5 пт.
6. *Требования к графическим файлам.*

Иллюстрации к статье готовятся в любом доступном для автора редакторе или приложении. При этом каждая иллюстрация ПРЕДСТАВЛЯЕТСЯ В ВИДЕ ОТДЕЛЬНОГО ФАЙЛА в одном из графических форматов: *.jpg, *.tif, *.eps, *.cdr, *.wmf, *.ai. НЕ ПРИНИМАЮТСЯ иллюстрации, созданные средствами Word. Допускается иллюстративный материал в формате *.xls (строго БЕЗ рамок). Все иллюстрации должны быть ЕДИНООБРАЗНЫ (шрифт, линии) по стилю.

Принимаются только черно-белые иллюстрации. Цветные изображения должны быть отредактированы авторами с учетом того, что цвет не является носителем информации, и проконвертированы в черно-белые (серые). Растровые иллюстрации должны иметь разрешение не менее 300 пикс./дюйм.

Размер и ориентация иллюстрации подбираются автором в соответствии с размером полосы верстки, которая составляет 195×125 мм (максимальный размер иллюстрации, включая под-рисуючную подпись и легенду).

Для иллюстраций в векторном формате (рисунок в формате Corel Draw, Adobe Illustrator, Microsoft Excel или файлы, экспортированные в формат *.wmf) необходимо использовать только стандартные шрифты Windows (Times New Roman, Symbol) или их аналоги Type-1. При использовании иных шрифтов они должны быть проконвертированы в кривые.

Для оцифровки осей рисунков необходимо использовать только вышеуказанные шрифты НОРМАЛЬНОГО начертания, размером не более 10 пт. Десятичный знак при оцифровке осей и аппликаций – только ЗАПЯТАЯ.

Все карты, схемы, диаграммы, рисунки должны быть на русском языке.

7. *Требования к формулам.*

Для набора формул в версиях Microsoft Word 2010 (2013) следует использовать формульный редактор MathType; для версий Microsoft Word 2007 и более ранних, кроме MathType, можно использовать встроенный в Microsoft Word редактор Equation Editor. Размер шрифта основного текста – 10.

8. *Требования к списку литературы*

Список работ, на которые есть ссылки в тексте, формируется в алфавитном порядке по фамилии первого автора (при отсутствии автора используется первая буква названия работы). Сначала идет перечень публикаций на русском языке, далее – зарубежных публикаций также в алфавитном порядке. Все работы из списка оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылка на работу дается в тексте следующим образом. Если число авторов не превышает двух, то в квадратных скобках приводится фамилия автора (авторов) без инициалов и через запятую год издания. Если число авторов три и более, то ссылка дается в форме [*Фамилия первого автора* и др., год издания].

С полным перечнем требований к статьям можно ознакомиться на web-странице журнала <http://www.aari.ru/main.php>.

Редакция оставляет за собой право делать необходимые редакционные исправления, дополнения, сокращения.

За размещение статей в журнале плата НЕ ВЗИМАЕТСЯ.

Всем авторам публикаций бесплатно высылается один экземпляр журнала.

Подписано в печать 13.09.2013
Формат 70×100 1/16
Тираж 200

Печать офсетная
Печ. л. 7,5
Заказ № 254

Типография издательства Политехнического университета
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29