

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.

ДААННЫЕ 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).

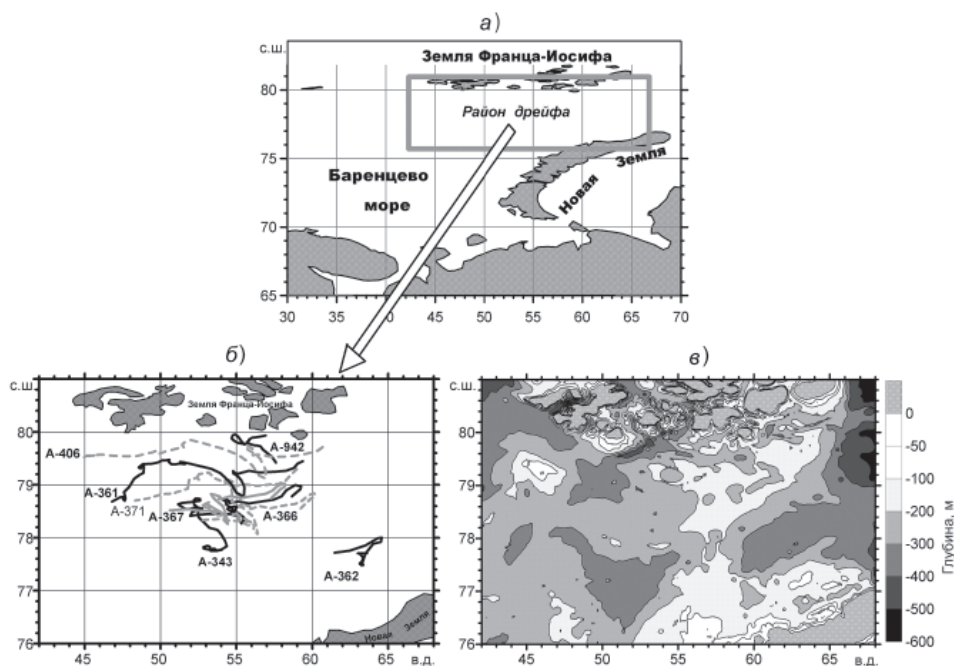


Рис. 1. Район (а), карты траекторий дрейфа айсбергов (б) и глубин (в) в мае–августе 2009 г.

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. Буи изготовлены 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. 1б).

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

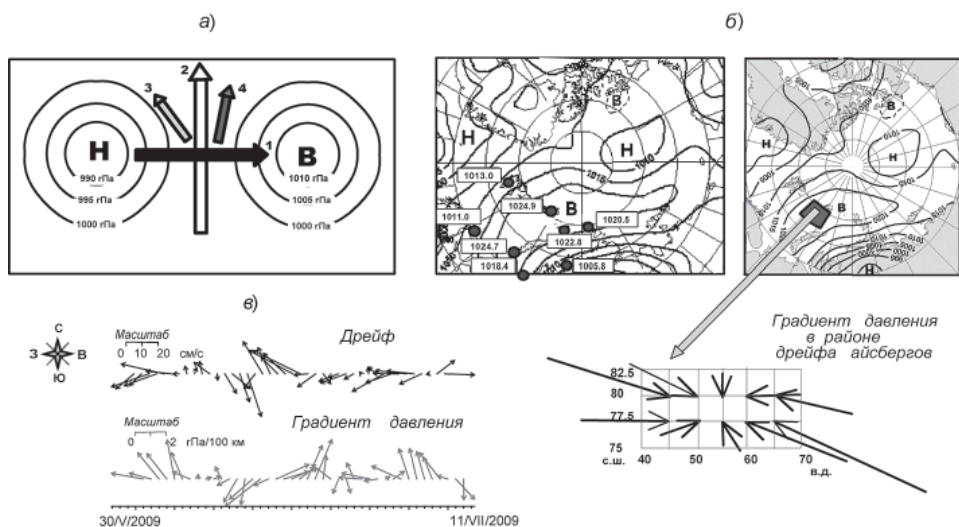


Рис. 2. Поле атмосферного давления и дрейф: а – схема изобарического дрейфа в системе циклон (Н) – антициклон (В). Стрелками показаны направления градиента давления (1), геострофического ветра (2), приповерхностного ветра (3), дрейфа (4); б – поля атмосферного давления на уровне моря по данным измерений 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° 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 ∇P необходимо интерполировать в точку положения айсберга на каждый момент времени. Для взаимного согласования значения V и ∇P усреднены за сутки. Временные ряды среднесуточных значений ∇P и V для А-406 на рис. 2в демонстрируют четкую реакцию ∇P на изменения 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 $V(V_x, V_y)$ 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 [Бельшев 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 m_V . Дисперсия – тензор второго ранга, определенный как математическое ожидание тензорного произведения центрированных векторов

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

Элементами тензора (1) являются дисперсии D , и ковариации K , соответствующих проекций. Для приведения симметричного тензора D_V к диагональному виду исходная система координат развернута на угол α , соответствующий направлению максимальной изменчивости 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 [Бельшев 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_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 $v = \sqrt{I_1} / m_v$ – 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; 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 $\sigma_V = \sqrt{D_V} = \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} \end{pmatrix}$ (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

$$Cov_{V\nabla P} = \begin{pmatrix} K_{Vx\nabla Px} & K_{Vx\nabla Py} \\ K_{Vy\nabla Px} & D_{Vy\nabla Py} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} + 0,5G \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В отличие от тензора (1) линейный инвариант I_1 симметричной части тензора (3) характеризует интенсивность взаимных изменений коллинеарных составляющих векторов V и ∇P , а инвариант G кососимметричной части (3), названный индикатором вращения, характеризует интенсивность взаимных изменений ортогональных составляющих.

Временной ряд скорости дрейфа V описывает тензор спектральной плотности $S_V(\omega)$. 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 V и ∇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 сплаженным одночасовым значениям V и мгновенным (через 6 ч) значениям ∇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_{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_{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 $m_{\nabla P}$ и эллипсы $\sigma_{\nabla P}$ ориентированы по геострофическому ветру.

Согласно табл. 4 и рис. 3а у А-406 распределения вероятностей V и ∇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 V отмечается для дрейфа, направленного на запад со скоростью 15–20 см/с. Главная мода ∇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 V и ∇P .

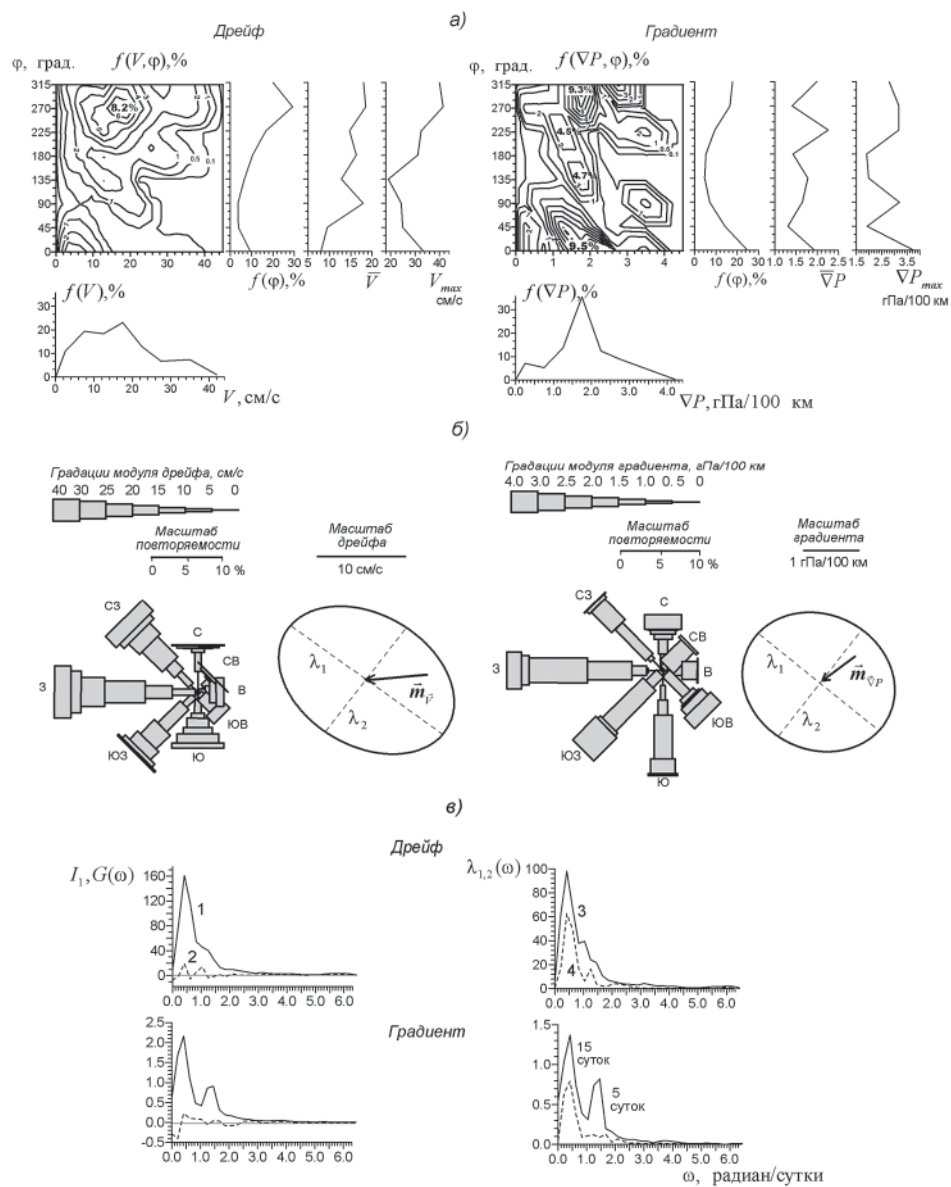


Рис. 3. Вероятностные характеристики скорости дрейфа айсберга А-406 и градиента давления: *a* – графики двумерной, одномерных повторяемостей и распределение средних и максимальных модулей по румбам; *б* – розы двумерной повторяемости, совмещенные векторы средней скорости и эллипсы СКО (для градиента 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 $S_V(\omega)$ на рис. 3*в* представлен графиками инвариантов, цифрами обозначены периоды колебаний в сутках. Спектры V и ∇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 $v_V \cong 2,5$, $v_{VP} \cong 3,5$. Распределение дисперсии по направлениям (вытянутость эллипса) у VP почти изотропное – 0,86, а у V анизотропное – 0,70.

Таблица 5

Характеристики изменчивости градиента давления (a), (гПа/100 км) и скорости дрейфа (b), (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	a	1,31	0,74	3,24	0,21	327	1,49	1,11	1,00	0,89	56	0,75	7,1
	b	8,7	6,0	25,8	1,8	221	10,5	8,1	6,6	0,81	276	0,67	5,8
361	a	1,50	0,76	3,24	0,61	327	1,58	1,20	1,02	0,84	31	0,77	2,6
	b	10,3	7,3	30,4	5,8	251	11,3	9,0	6,9	0,76	304	0,58	1,9
362	a	1,60	0,73	2,84	0,56	305	1,70	1,42	0,94	0,66	310	0,82	3,0
	b	13,4	9,4	31,5	3,8	92	16,2	14,1	7,9	0,56	52	0,66	4,3
366	a	1,40	0,79	3,24	0,29	345	1,58	1,14	1,09	0,96	40	0,75	5,4
	b	9,6	7,2	30,9	2,4	263	11,8	8,7	7,9	0,91	275	0,63	4,9
367	a	1,61	0,82	3,24	0,45	337	1,76	1,34	1,15	0,86	235	0,78	3,9
	b	11,4	7,0	27,1	3,7	262	12,9	9,8	8,4	0,86	288	0,71	3,5
371	a	1,68	0,77	3,24	0,71	325	1,73	1,37	1,05	0,76	43	0,80	2,4
	b	12,5	7,45	31,3	6,7	252	13,0	10,0	8,3	0,83	330	0,67	1,9
406	a	1,69	0,74	3,20	0,67	323	1,73	1,31	1,13	0,86	26	0,82	2,6
	b	15,1	8,5	34,2	8,1	265	15,4	12,6	8,8	0,70	300	0,69	1,9
942	a	1,07	0,51	2,08	0,32	283	1,16	1,00	0,58	0,58	228	0,81	3,6
	b	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

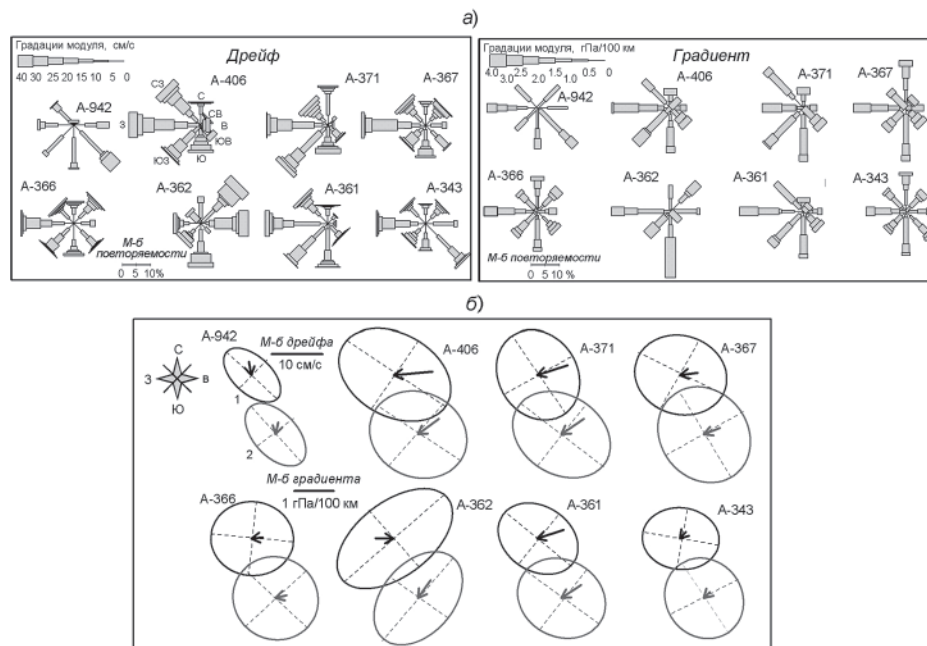


Рис. 4. Розы двумерной повторяемости (а) и совмещенные векторы средней скорости и эллипсы СКО (б) дрейфа восьми айсбергов (1) и градиента давления (2, развернуты в направлении геострофического ветра).

m_V от 2 до 8 см/с. Генеральное направление дрейфа у семи айсбергов к З-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 $V_V - V_{VP}$, 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 $V_V > V_{VP}$ (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 m_V и эллипсы σ_V 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

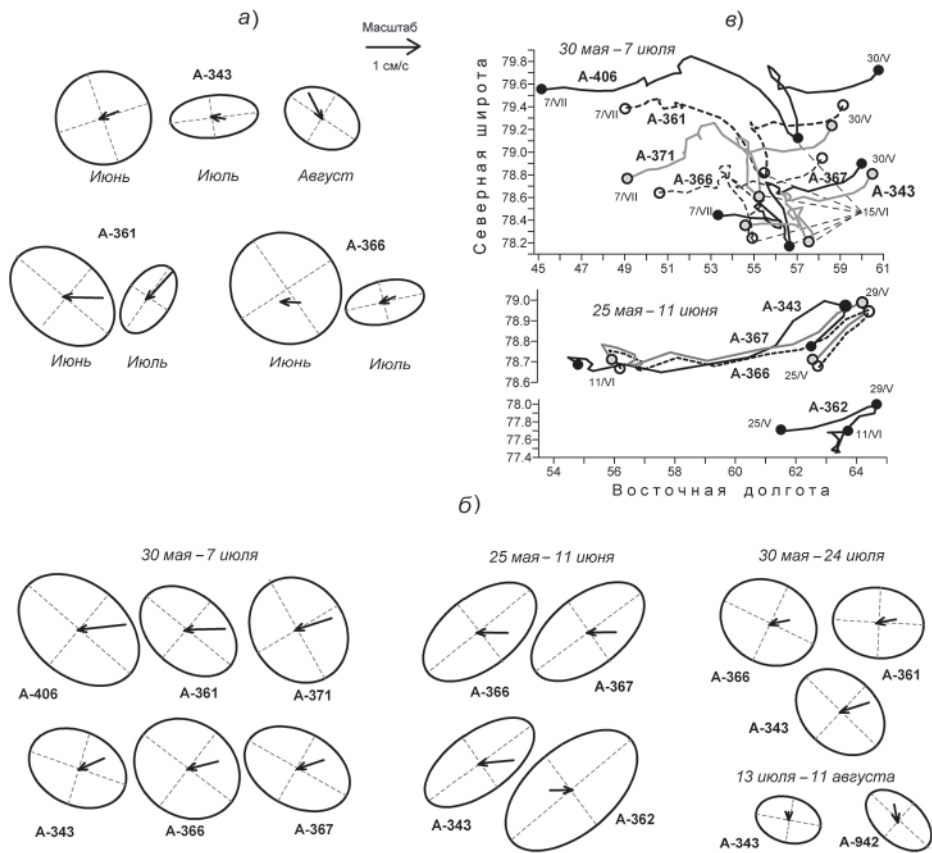


Рис. 5. Эволюция и пространственная изменчивость дрейфа айсбергов: а, б – совмещенные векторы математического ожидания и эллипсы СКО скорости дрейфа на одномесячных отрезках (а) и при синхронном дрейфе (б); в – датированные траектории синхронного дрейфа.

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	$R_v^2 \equiv \mu^2$	$\mu = \sqrt{r_{\uparrow\downarrow}^2 + r_{\perp}^2}$
20-я строка сверху	$r_{\uparrow\downarrow} = 0$, а $r_{\perp} = 0$	$r_{\perp} = 0$, а $r_{\uparrow\downarrow} > 0$