

**ВЕТРОВОЙ ДРЕЙФ СТАНЦИИ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС-35»**

науч. сотр. *Н.Е.ИВАНОВ*, глав. спец. *А.А.ВИСНЕВСКИЙ*,  
нач. ВАЭ *В.Т.СОКОЛОВ*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, *neivanov@aari.nw.ru*, *ale68197045@aari.nw.ru*, *svt@aari.nw.ru*

*Выполнен анализ дрейфа станции «Северный полюс-35» (СП-35) с октября 2007 г. по июль 2008 г. Параметры изменчивости скоростей ветра и дрейфа и показатели векторной корреляции получены на основе векторно-алгебраического метода в инвариантной форме, регрессия дрейфа по ветру определена по теории А.М.Обухова. Установлено, что дрейф СП-35 практически полностью определялся ветром, общая корреляция составляет около 0,9, а расчетная траектория практически идеально воспроизводит реальный дрейф. Приведен алгоритм вычисления скорости дрейфа по координатам с учетом временной дискретности, погрешностей и неопределенностей исходных данных. Показана возможность использования архива ААНИИ для анализа всего исторического массива данных по дрейфу станций «Северный полюс».*

*Ключевые слова:* ветровой дрейф льда, скорость дрейфа, скорость ветра, векторная регрессия, показатели векторной корреляции.

Станция СП-35 работала с сентября 2007 г. по июль 2008 г. в евразийском суббассейне Северного Ледовитого океана (СЛО). Траектория дрейфа проходила преимущественно в широтном направлении севернее архипелага Земля Франца-Иосифа от точки севернее архипелага Северная Земля до точки восточнее архипелага Шпицберген. Район дрейфа СП-35 отличается от районов дрейфа большинства станций «Северный полюс».

Содержанием и основной задачей настоящей работы является статистический анализ генерального дрейфа СП-35 и его сопряженности с ветром. В основу положен векторно-алгебраический метод анализа изменчивости и корреляции случайных векторов и теория векторной линейной регрессии, разработанная А.М.Обуховым. Основные положения методики анализа изменчивости и сопряженности векторных случайных величин изложены в первой части статьи, приведена подробная библиография.

Важность раздела «Данные и их предварительная обработка» обусловлена тем, что для СП-35 имеются два источника данных по географическим координатам и скорости ветра. В первом из них [10] невысокая точность задания координат  $\pm 0,1^\circ$  по широте и по долготы и большая дискретность (4 срока в сутки) могут привести к заметным погрешностям в вычисленных скоростях дрейфа. Во втором источнике данных, где ветер и координаты (формальная точность записи  $10^{-8^\circ}$ ) заданы с одномоментной дискретностью, имеется неопределенность, обусловленная неизвестной реальной точностью наблюдений, которая у каждого из наблюдений может быть индивидуальной. Эти данные получены непосредственно в Высокоширотной арктической экспедиции (ВАЭ) ААНИИ. В работе приведен алгоритм вычисления скорости дрейфа по координатам с учетом возможных ошибок и неопределенностей.

На сайте ААНИИ [10] размещен архив четырехсрочных данных по всем станциям «Северный полюс». Поэтому задачей сравнительного (по двум источникам

данных) анализа является установление возможности использования этого архива и предложенных методических приемов для анализа исторического массива данных по дрейфу всех станций «Северный полюс».

В разделе «Обсуждение результатов» приведены сравнительные (по двум источникам данных) оценки параметров изменчивости, регрессии и корреляции скоростей ветра и дрейфа.

### МЕТОДИКА СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗМЕНЧИВОСТИ, РЕГРЕССИИ И КОРРЕЛЯЦИИ СКОРОСТЕЙ ДРЕЙФА И ВЕТРА

Для характеристики скоростей дрейфа  $\vec{V}$  и ветра  $\vec{W}$  как случайных векторов использован векторно-алгебраический метод [1], учитывающий совокупные эффекты изменчивости модуля и направления и основанный на модели евклидова вектора  $\vec{V}$  с модулем  $V$ , направлением  $\varphi$  и с декартовыми проекциями  $V_x, V_y$ , для которого определены сложение по правилу параллелограмма, скалярное, векторное и тензорное умножение и правила преобразования координат при развороте исходной системы отсчета [6].

Использованы следующие вероятностные характеристики изменчивости – вектор средней скорости  $\vec{m}_v$ , тензоры дисперсии  $\sigma_v$ , среднеквадратического отклонения (СКО)  $\sigma_v = d_v^{0,5}$  и тензор взаимной дисперсии (ковариации)  $d_{vw}$ . Для плоских векторов тензоры можно представить квадратными матрицами второго ранга, элементами которых являются дисперсии и ковариации соответствующих декартовых проекций

$$d_{wv} = \begin{pmatrix} d_{w_x v_x} & d_{w_x v_y} \\ d_{w_y v_x} & d_{w_y v_y} \end{pmatrix}, \quad d_w = \begin{pmatrix} d_{w_x w_x} & d_{w_x w_y} \\ d_{w_y w_x} & d_{w_y w_y} \end{pmatrix}, \quad d_v = \begin{pmatrix} d_{v_x v_x} & d_{v_x v_y} \\ d_{v_y v_x} & d_{v_y v_y} \end{pmatrix},$$

кинематические свойства которых описывают инварианты – скалярные функционалы элементов матрицы тензора, не изменяющиеся при развороте исходной системы координат. Инвариантами симметричных тензоров  $d_v$  и  $\sigma_v$  являются  $\lambda_{1,2}, I_1, \chi, \alpha$ . Числа  $\lambda_{1,2}$  характеризуют распределение дисперсии по ортогональным направлениям, угол  $\alpha$  задает направление максимальной изменчивости  $\lambda_1$ . Тензор  $\sigma_v$  можно представить эллипсом с полуосями  $\lambda_{1,2}$ , большая ось которого развернута на угол  $\alpha \pm 180^\circ$ , отсчитываемый от направления на север вправо и влево. Вытянутость эллипса  $\sigma_v$  описывает инвариант  $\chi = \lambda_2/\lambda_1$ . Отметим, что в векторно-алгебраическом методе направление максимальной изменчивости определено без дополнительных предположений (поскольку инварианты  $\lambda_{1,2}$  определены как собственные значения соответствующих тензоров), тогда как в покомпонентном методе (модель скорости – пара чисел  $V_x, V_y$ ) для определения «главных» среднеквадратических отклонений  $\sigma_x, \sigma_y$  необходима априорная гипотеза о виде распределения вероятностей системы случайных величин  $\{V_x, V_y\}$  (в [9] использовано нормальное эллиптическое распределение).

Линейный инвариант  $I_1 = \lambda_1 + \lambda_2$  характеризует общую интенсивность изменчивости скорости за счет как модуля, так и направления. Поэтому дополнение до 1 отношения  $\gamma_d = d_v/I_1$  дисперсии модуля скорости к линейному инварианту определяет вклад изменчивости направления в общую дисперсию. При графическом представлении полезно совмещать эллипс СКО и вектор  $\vec{m}_v$ . Число  $v = I_1/m$  является векторным аналогом коэффициента вариации, при  $v \leq 1$  процесс устойчивый, при  $v > 1$  – неустойчивый. Инвариантом кососимметричной части тензора  $d_{vw}$  является индикатор вращения  $D$ , описывающий эффекты взаимных изменений направления скоростей ветра и дрейфа.

Теория линейной регрессии для абстрактных алгебраических векторов предложена в работах [7, 8], в работе [5] она распространена на случай евклидовых векторов. Уравнение регрессии имеет вид

$$\vec{V}_i = A_{v\vec{w}} \vec{W}_i + \vec{B}_{v\vec{w}} + \vec{\varepsilon}_i \equiv \vec{V}'_i + \vec{\varepsilon}_i, \quad A_{v\vec{w}} = d_{v\vec{w}} d_v^{-1}, \quad \vec{B}_{v\vec{w}} = \vec{m}_v - A_{v\vec{w}} \vec{m}_{\vec{w}}. \quad (1)$$

В случае строго детерминированной зависимости, т.е. когда измеренные  $\vec{V}_i$  и предсказанные  $\vec{V}'_i$  значения совпадают, коэффициент регрессии  $A_{V\vec{W}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  – единичный тензор, необъяснимый остаток  $\vec{\varepsilon}_i$  – нулевой вектор. Свободный член – вектор  $\vec{B}_{V\vec{W}}$  в общем случае зависит от соотношения математических ожиданий  $\vec{m}_V, \vec{m}_{\vec{W}}$ .

Вычисления по (1) численно совпадают с расчетами по методу [2, 3], однако мы считаем нецелесообразным представление регрессии в терминах ветрового коэффициента и угла отклонения дрейфа, т.к. это приводит к искусственному выделению модуля и направления как самостоятельных характеристик из единого объекта – вектора. Тем не менее оценки ветрового коэффициента  $k$  и угла отклонения  $\psi$  нужны для сопоставления с ранее полученными результатами. Их легко получить, сопоставляя измеренные значения скорости ветра  $\vec{W}$  со значениями скорости дрейфа  $\vec{V}'$ , вычисленными по уравнению (1):  $k = V'/W$ ,  $\psi = \Phi_{V'} - \Phi_{\vec{W}}$ .

Для характеристики тесноты зависимости использована система показателей коллинеарной  $r_{\uparrow\downarrow}$  и ортогональной  $r_{\perp}$  корреляции в инвариантной форме. Идея метода предложена в работе [5] и реализована в работе [4]. Основной смысл состоит в оценке вкладов в общую корреляцию сопряженности взаимно коллинеарных и взаимно ортогональных составляющих векторов. Показатели определены как отношения инвариантов  $I_1$  и  $D$  тензора  $d_{V\vec{W}}$  к произведению инвариантов  $I_1$  тензоров  $d_V$  и  $d_{\vec{W}}$ :

$$r_{\uparrow\downarrow} = \frac{I_1^{(V\vec{W})}}{\sqrt{I_1^{(V)} I_1^{(\vec{W})}}}, \quad r_{\perp} = \frac{D^{(V\vec{W})}}{\sqrt{I_1^{(V)} I_1^{(\vec{W})}}}, \quad \mu = \sqrt{r_{\uparrow\downarrow}^2 + r_{\perp}^2}. \quad (2)$$

Число  $\mu$  названо индикатором векторной корреляции, в случае детерминированной зависимости  $\mu = 1$ , при стохастической зависимости  $\mu < 1$ . Коэффициент детерминации  $R_p^2 = \mu^2$  определяет долю общей дисперсии, объясняемую регрессией (1). Если зависимость полностью определяется взаимно коллинеарными составляющими,  $\mu = r_{\uparrow\downarrow}$ ,  $r_{\perp} = 0$  ( $\vec{V}$ ,  $\vec{W}$  однонаправлены –  $r_{\uparrow\downarrow} > 0$  и наоборот). Если векторы  $\vec{V}$  и  $\vec{W}$  развернуты друг относительно друга на угол  $+\beta$ , то  $r_{\uparrow\downarrow} > 0$ , при развороте на угол  $-\beta$   $r_{\uparrow\downarrow} < 0$ ; если  $\beta < 45^\circ$  (по абсолютной величине), то  $r_{\uparrow\downarrow} > r_{\perp}$  и наоборот. Подробнее кинематическая интерпретация изложена в [4].

В работах [2, 3] использована покомпонентная модель вектора скорости (матрица-строка или матрица-столбец с декартовыми проекциями в качестве компонентов), корреляция векторов представлена корреляционной матрицей, что затрудняет кинематическую интерпретацию, т.к. каждый ее элемент имеет самостоятельное значение, а совместная трактовка невозможна без введения дополнительных предположений. В векторно-алгебраическом методе параметры изменчивости, регрессии и корреляции были определены через инварианты

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left\{ (d_{W_x V_x} + d_{W_y V_y}) \pm \sqrt{(d_{W_x V_x} - d_{W_y V_y})^2 + (d_{W_x V_y} - d_{W_y V_x})^2} \right\},$$

$$I_1 = \lambda_1 + \lambda_2, \quad D = d_{W_x V_y} - d_{W_y V_x}$$

тензоров  $d_{V\vec{W}}$ ,  $d_V$ ,  $d_{\vec{W}}$ . Формулы содержат комбинации обеих проекций каждого из векторов, т.е. учитывается совокупный эффект изменчивости и сопряженности модулей и направлений.

Согласно имеющимся представлениям, основными составляющими генерального дрейфа в СЛО являются «чисто ветровая», связанная с локальным ветром, и «неветро-

вая», практически не зависящая от локального ветра в момент наблюдений. Согласно [9] неветровая составляющая связана в первую очередь с наклоном уровенной поверхности и градиентными течениями преимущественно бароклинного характера. Поэтому характерный масштаб временной изменчивости у таких течений многократно больше, чем у чисто ветровой составляющей. В работе [2] такие течения рассматриваются как квазипостоянные, для их выделения использован косвенный метод, учитывающий данные измерений ветра, суммарного дрейфа и расчета чисто ветрового дрейфа, т.е. за счет введения в уравнение (1) скорости «постоянного» течения  $\vec{U}$ :

$$\vec{V}_i = A_{\vec{V}\vec{W}}\vec{W}_i + \vec{B}_{\vec{V}\vec{W}} + \vec{U} + \vec{\varepsilon}_i \equiv \vec{V}'_i + \vec{U} + \vec{\varepsilon}_i.$$

Если корреляция ветра и дрейфа меньше 1, фактическая и расчетная траектории дрейфа не будут совпадать. Тогда скорость  $\vec{U}$  можно оценить по вектору, идущему из конечной точки траектории реального дрейфа в конечную точку траектории расчетного дрейфа. Если же корреляция близка к 1, для этой цели можно использовать значение  $m_{\varepsilon}$ , получаемого осреднением остатков  $\vec{\varepsilon}_i$  из уравнения (1) на характерных участках траектории дрейфа за длительные (не менее декады) промежутки времени. При этом необходимо учитывать, что для полной совокупности данных  $\vec{\varepsilon}_i, i = 1, 2, \dots, n$  справедливо тождество  $m_{\varepsilon} \equiv 0$ .

## ДАнные И Их Предварительная обработка

### Исходные данные

На рис. 1а приведен график (крупно) в координатах долгота ( $X$ ) – широта ( $Y$ ) и карта (мелкая врезка) дрейфа СП-35. В настоящей статье рассматривается дрейф в ограниченном районе СЛО. Начальная точка траектории около  $85,1^\circ$  с.ш.,  $78^\circ$  в.д., конечная точка около  $81,0^\circ$  с.ш.,  $31^\circ$  в.д., дрейф происходил преимущественно вдоль широты к западу; минимум и максимум  $Y$  около  $81,3 \div 85,7^\circ$  с.ш.,  $X$  около  $29,4 \div 105,3^\circ$  в.д. Выделено 4 характерных участка траектории – ранее 21.12.2007, 21.12.2007–14.02.2008, 15.02–15.05.2008, 16.05–09.07.2008. Такое разделение частично согласуется как с календарными, так и с естественными сезонами [9].

Исходными данными являются значения широты и долготы (по GPS-обсервациям) и скорости ветра  $\vec{W}$ . Имеются 2 источника данных:

–  $A$  – на сайте ААНИИ [10] приведены значения  $X, Y$  (с точностью до  $0,1^\circ$ ) и  $\vec{W}$  с 21.09.2007 по 13.07.2008, дискретность  $\Delta t = 6$  ч;

–  $B$  – массив учащенных значений ( $\Delta t = 1$  мин)  $\vec{W}$  с 18.10.2007 по 09.07.2008 и  $X, Y$  (с точностью до 8-го десятичного знака) по данным системы GPS, надежные координаты с 21.12.2007.

В настоящей работе данные  $A$  взяты с 18.10.2007 по 09.07.2008 (начало и окончание лимитировано одномоментными данными  $\vec{W}$  из массива  $B$ ), данные  $B$  взяты с 21.12.2007. На рис. 1а дрейф  $B$  (толстая линия) плавный, а дрейф  $A$  (тонкая линия) ступенчатый, т.е. точность  $\pm 0,1^\circ$  и дискретность 6 ч данных  $A$  могут оказаться недостаточными. В то же время во всем диапазоне широт и долгот сопряженность  $X_A \div X_B$  и  $Y_A \div Y_B$  оказывается сильной. В табл. 1 приведены параметры регрессии  $X_B = aX_A + b + \varepsilon, Y_B = aY_A + b + \varepsilon$ , коэффициенты корреляции, минимальные и макси-

Таблица 1

Оценки корреляции и параметров линейной регрессии координат и скоростей дрейфа по массивам  $A$  и  $B$

Широта						Долгота					
$r$	$a$	$b$	$\sigma_{\varepsilon}$	$\min_{\varepsilon}$	$\max_{\varepsilon}$	$r$	$a$	$b$	$\sigma_{\varepsilon}$	$\min_{\varepsilon}$	$\max_{\varepsilon}$
0,9997	0,997	0,18	0,033	-0,13	0,15	0,9999	1,0001	0,04	0,165	-1,95	1,96

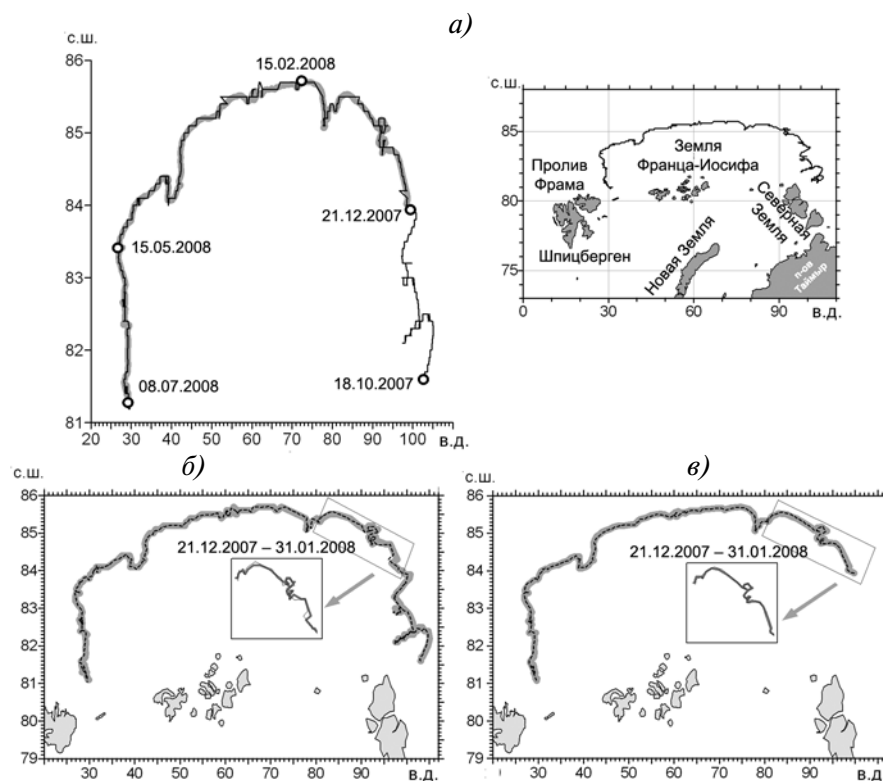


Рис. 1. График и карты измеренного и рассчитанного по регрессии с ветром дрейфа СП-35: *a* – график и карта измеренного дрейфа по данным А (тонкая линия) и Б (толстая линия); *б, в* – измеренный (толстая линия) и рассчитанный (тонкая линия) дрейф по данным А (*б*) и Б (*в*), на врезках отрезок фактического и расчетного дрейфа с 21.12.2007 по 31.01.2008

мальные (по абсолютной величине) остатки  $\epsilon$ , полученные по синхронным значениям координат из массивов *A* и *B*. Корреляция и коэффициент регрессии практически не отличимы от 1, свободный член и необъясняемый остаток близки к 0.

Сравнение результатов по данным *A* и *B* является еще одной задачей настоящей работы. Ее актуальность связана с тем, что на сайте [10] данные *A* есть для всех станций СП (кроме СП-1), и речь идет о применимости этих данных и используемых методических приемов для анализа всей исторической информации по дрейфу станций «Северный полюс».

#### Вычисление, сглаживание и осреднение скоростей дрейфа

Скорость дрейфа  $\vec{V}$ , средняя за интервал дискретности  $\Delta t$  между двумя последовательными наблюдениями, вычислена по соответствующим разностям широт и долгот. В качестве модели фигуры Земли принят эллипсоид вращения с параметрами: длина экватора 40008,6 км, длина меридиана 40075,7 км, длина дуги меридиана в  $1^\circ$  на широте  $80 \div 85^\circ$  составляет 111,6 км.

Необходимо определить оптимальную продолжительность интервала дискретности. При малом  $\Delta t$  погрешность вычисления скорости может быть велика из-за ошибки измерения координат, высокочастотных пульсаций и возможного вращения льдины. Основными источниками ошибок являются в массиве *A* огруб-

ленная (до  $0,1^\circ$ ) запись координат, в массиве  $B$  – не всегда известная реальная точность наблюдений, которая для каждого измерения может быть индивидуальной. Численные эксперименты показали, что гарантированно высокая точность вычисления и взаимная согласованность скоростей дрейфа  $\vec{V}_A$  и  $\vec{V}_B$  для СП-35 достигаются при  $\Delta t_A = 24$  ч и  $\Delta t_B = 6$  ч.

Формально суточный интервал дискретизации подходит для решаемой задачи анализа генерального дрейфа станций «Северный полюс» (продолжительность всего дрейфа от нескольких месяцев до года и более), но при столь большом  $\Delta t$  могут возникнуть проблемы, связанные с необходимостью подавления приливных колебаний. Поэтому значения  $\vec{V}_A$  и  $\vec{V}_B$  определены по координатам с указанным временным сдвигом, но временные отрезки  $\Delta t$  взяты с перекрытием – в массиве  $A$  начало каждого последующего суточного отрезка сдвигается на 6 ч, в массиве  $B$  начало каждого шестичасового отрезка сдвигается на 1 ч. После этого выполнено скользящее осреднение для  $\vec{V}_A$  по двум смежным суточным отрезкам, для  $\vec{V}_B$  по 13-ти шестичасовым отрезкам, и по ним вычислены среднесуточные значения сглаженных скоростей  $\vec{V}_A$  и  $\vec{V}_B$ .

Среднесуточная скорость ветра  $\vec{W}$  получена по одномоментным измерениям из массива  $B$ . В работе [9] со ссылками на многочисленные источники показано, что дрейф льда в Арктическом бассейне СЛО имеет две основные составляющие: «чисто ветровую» и «неветровую». Первая из них тесно связана с локальным ветром в момент наблюдения. Тем не менее даже для ее характеристики измерений ветра в одной точке, строго говоря, недостаточно, т.к. необходимо знать ветер над всей льдиной и окружающим ее пространством, при том, что в структуре изменчивости  $\vec{W}$  важна мелкомасштабная составляющая с характерными пространственно-временными масштабами от десятков секунд до первых десятков минут и от метров до сотен метров. В реальных условиях ветер измеряется в одной точке, которая перемещается в пространстве в процессе дрейфа. Поэтому формальное временное осреднение является по существу пространственно-временным обобщением, что помогает решить эту проблему (хотя и не полностью).

Для решения второй задачи по анализу всего исторического массива данных дрейфа станций «Северный полюс» необходимо использовать данные 6-часовых измерений скорости ветра из массива  $A$ . Расчет по измерениям СП-35 показал, что среднесуточные значения  $\vec{W}_A$  (вычисленные по 4 измерениям через 6 ч) связаны со среднесуточными скоростями  $\vec{W}_B$  (вычисленными по 1440 одномоментным измерениям) почти детерминированной зависимостью –  $r_{\uparrow\downarrow} = 0,99$ ,  $r_{\perp} = 0,00$ . Это объясняется тем, что значения модуля и направления скорости ветра в массиве  $A$  получены приборами, используемыми для стандартных метеорологических измерений, т.е. уже непосредственно при измерении выполняется осреднение на масштабах от минут до первых десятков минут. Следовательно, большая дискретность данных ветра в массиве  $A$  не является препятствием для получения надежных рядов среднесуточного ветра.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Изменчивость скоростей дрейфа и ветра

Графики временных рядов скоростей дрейфа  $\vec{V}_A$ ,  $\vec{V}_B$  и  $\vec{W}$  приведены на рис. 2а. Отметим несомненное сходство основных особенностей во всех трех рядах и наличие участков с различным характером изменчивости.

Для характеристики изменчивости скоростей ветра и дрейфа в табл. 2 использованы: среднее значение, СКО и максимум модуля скорости; вектор средней скорости; линейный инвариант тензора дисперсии и параметры (длины полуосей, параметр формы и ориентация) эллипса СКО, а также векторный коэффициент вариации и от-

ношение  $\gamma_d$  дисперсии скалярной скорости к линейному инварианту тензора дисперсии. Графики двумерной (по модулю и направлению) и маргинальных повторяемостей и совмещенные векторы средней скорости и эллипсы СКО приведены на рис. 2б, в.

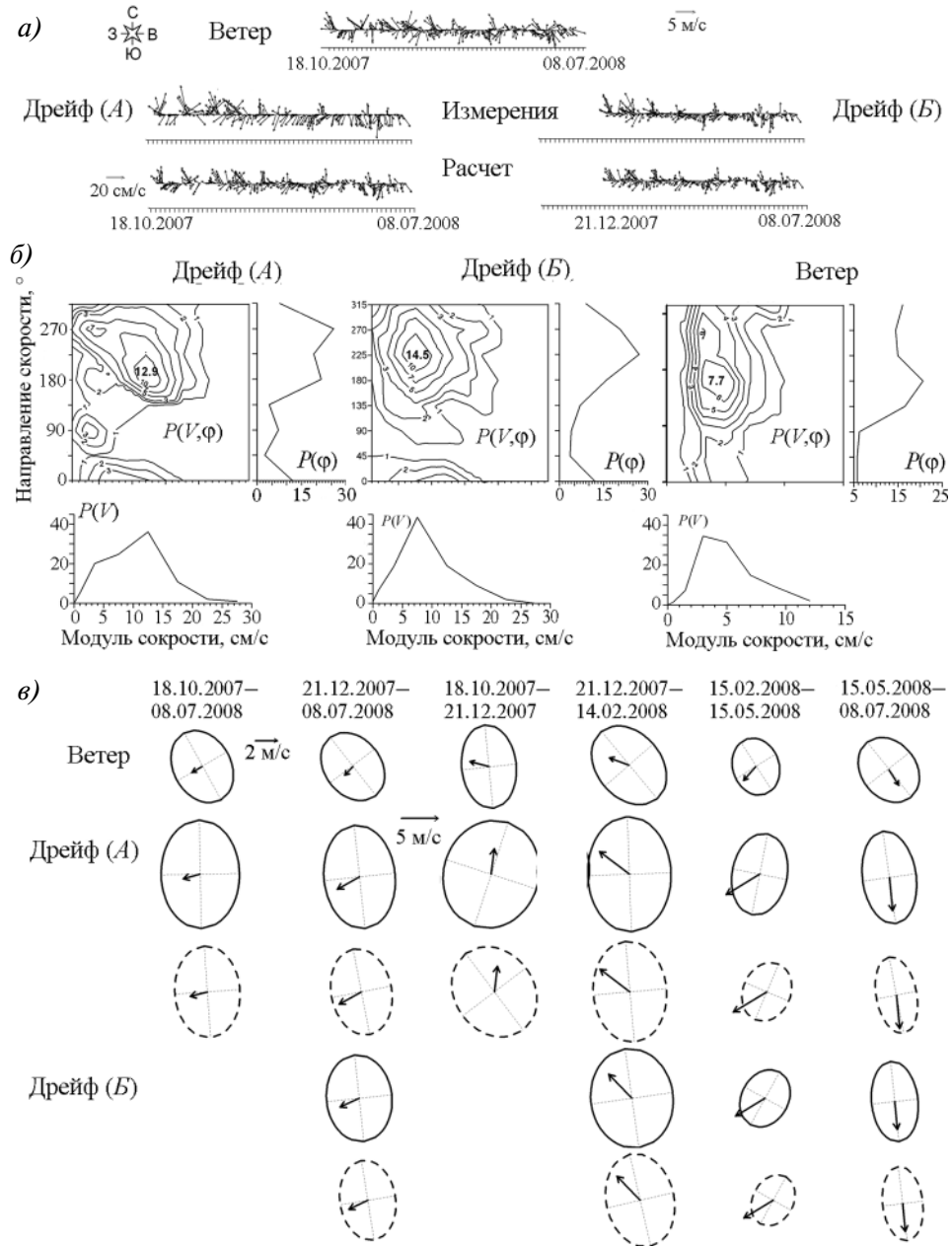


Рис. 2. Ряды измеренных и рассчитанных скоростей ветра и дрейфа (а) и оценки характеристик изменчивости (б, в): б – двумерная и маргинальная повторяемость (%), в – совмещенные векторы средней скорости и эллипсы СКО по измеренным (сплошная линия) и по рассчитанным (пунктир) данным

Оценки характеристик изменчивости скоростей дрейфа (по массивам А, Б) и ветра по всей траектории и по участкам

Дата начала, окончания и источник данных	Модуль			Средний вектор			СКО					$\gamma_d$	v
	$\vec{V}$ см/с или м/с <sup>1</sup>	$\sigma$ см/с или м/с	max см/с или м/с	$m_V$ см/с или м/с	$\varphi$ град.	$I_1^2$ см/с или м/с	$\lambda_1$ см/с или м/с	$\lambda_2$ см/с или м/с	$\chi$	$\alpha$ град.			
18.10.2007— 08.07.2008	А Ветер	5,6	31,6	3,2	255	10,8	8,8	6,4	0,73	359	0,57	4,68	
		2,3	11,5	1,3	241	5,2	4,2	3,2	0,75	330	0,44	5,76	
21.12.2007— 08.07.2008	А Б Ветер	5,3	26,6	4,1	241	10,2	8,4	5,8	0,69	354	0,52	3,45	
		4,7	24,3	3,4	245	8,8	7,0	5,3	0,73	354	0,53	3,66	
18.10.2007— 21.12.2007	А Ветер	2,3	11,5	1,3	223	5,1	4,1	3,1	0,76	322	0,45	5,66	
		6,8	31,6	4,1	337	11,7	8,8	7,7	0,87	18	0,58	3,99	
21.12.2007— 14.02.2008	А Б Ветер	2,5	11,2	2,3	283	5,5	4,6	3,0	0,65	354	0,45	3,35	
		6,5	26,6	6,1	317	11,5	9,3	6,8	0,72	358	0,70	2,66	
15.02.2008— 15.05.2008	А Б Ветер	5,7	24,3	5,4	316	10,5	8,1	6,7	0,82	352	0,54	2,75	
		2,6	11,5	2,3	291	6,0	4,8	3,5	0,74	320	0,43	3,65	
16.05.2008— 08.07.2008	А Б Ветер	4,3	18,2	6,3	239	8,0	6,6	4,5	0,67	11	0,54	1,76	
		1,8	9,6	2,0	222	4,1	3,2	2,5	0,80	342	0,56	2,84	
16.05.2008— 08.07.2008	А Б Ветер	3,6	18,2	5,5	239	6,7	4,9	3,8	0,78	29	0,54	1,58	
		5,3	2,8	5,4	174	8,7	7,5	4,4	0,58	352	0,61	2,21	
16.05.2008— 08.07.2008	А Б Ветер	4,8	2,4	4,5	175	7,5	6,5	3,8	0,58	352	0,74	2,28	
		2,7	10,0	2,0	147	4,9	3,9	3,0	0,78	322	0,55	3,45	

Примечания. 1. Скорость в см/с используется для параметров А и Б, скорость м/с — для скорости ветра. 2. Здесь и в табл. 6 символом  $I_1$  обозначен квадратный корень линейного инварианта тензора дисперсии



Согласно рис. 2 распределения вероятностей скоростей дрейфа и ветра взаимоподобны. Все три распределения одномодальные, мода приходится на  $135 \div 180^\circ$  по направлению,  $1 \div 5$  м/с по модулю у ветра и на  $180 \div 270^\circ$  по направлению,  $5 \div 15$  см/с по модулю у дрейфа. Правый разворот дрейфа по отношению к ветру согласуется с имеющимися представлениями. Большая сосредоточенность распределения  $\vec{V}_B$  по сравнению с  $\vec{V}_A$  указывает, по нашему мнению, на более высокое качество этого массива, модальные значения повторяемости  $P(V, \varphi)$  составляют 12,9 %, 14,5 %, 7,7 % для  $\vec{V}_A$ ,  $\vec{V}_B$ ,  $\vec{W}$  соответственно.

Совмещенные векторы  $\vec{m}_v$  и эллипсы  $\sigma_v$  (по всей траектории дрейфа) указывают на правый разворот средней скорости  $\vec{V}$  относительно  $\vec{W}$  на угол  $20 \div 25^\circ$  ( $\varphi_W = 223^\circ$ ,  $\varphi_A \cong \varphi_B = 241 \div 245^\circ$ ). Значения модулей среднего дрейфа и максимальной скорости по данным *A* и *B* также близки:  $m_A = 4,1$  см/с,  $m_B = 3,4$  см/с,  $\max_A = 26,6$  см/с,  $\max_B = 24,3$  см/с. Размеры эллипсов СКО существенно превосходят длину векторов средней скорости, так что все три процесса неустойчивые ( $v \gg 1$ ); это особенно заметно у ветра ( $v_W = 5,7$ ), тогда как у дрейфа  $v_A = 3,7$  и  $v_B = 3,6$ . Отметим также увеличенную общую изменчивость  $\vec{V}_A$  по сравнению с  $\vec{V}_B$ , тогда как по форме и ориентации эллипсы  $\sigma_v$  для массивов *A*, *B* практически не различаются. Эллипс  $\sigma_W$  ориентирован в направлении северо-запад–юго-восток, а эллипсы  $\sigma_v$  — в меридиональном направлении, т.е. направления средней скорости и максимальной изменчивости не совпадают. Отметим также довольно сильное различие дисперсий по ортогональным направлениям ( $\chi \ll 1$ ). Оценки отношения  $\gamma_d$  показывают соизмеримый вклад изменений модуля и направления в общую дисперсию.

При переходе от одного участка траектории к другому происходит сильное изменение всех параметров, кроме  $\gamma_d$ . При этом изменения для ветра и дрейфа взаимно согласованы, а различия между оценками по массивам *A* и *B* (для одного и того же участка) существенно меньше пространственно-временной изменчивости. Модуль и направление среднего дрейфа изменяются в интервалах  $4 \div 6$  см/с и  $175 \div 335^\circ$ , при том, что различия между синхронными данными по массивам *A* и *B* не превышают 1 см/с и  $2^\circ$ . Еще сильнее изменяются величина и форма эллипсов  $\sigma_v$  — диапазоны  $I_1$  и  $\chi$  составляют  $5 \div 12$  см/с и  $0,6 \div 0,9$ .

Таким образом, табл. 2 и рис. 2 демонстрируют соответствие характеристики изменчивости дрейфа изменениям ветра и взаимную согласованность оценок по массивам *A*, *B*; некоторое различие оценок по массивам *A* и *B* указывает, по видимому, на большую надежность оценок по массиву *B* из-за неточного задания координат в массиве *A*.

### Регрессия и корреляция

Линейная регрессия скорости дрейфа по скорости ветра определена уравнением (1). Значения компонентов тензора регрессии  $A_{W\vec{V}}$ , модуля и направления вектора  $\vec{B}_{W\vec{V}}$  приведены в табл. 3; они нужны в первую очередь для вычисления скорости дрейфа по ветру  $\vec{V}'_i = A_{W\vec{V}} \vec{W}_i + \vec{B}_{W\vec{V}_i}$  и сами по себе не нуждаются в подробном обсуждении. Отметим лишь постоянство по знаку («+» или «-») элементов тензора  $A_{W\vec{V}}$  на различных участках траектории.

Сопоставление значений скорости дрейфа — реальных и вычисленных по формуле (1) — с параметрами из табл. 3 представлено рядами векторов скорости на рис. 2а (вверху измеренные  $\vec{V}$ , ниже расчет  $\vec{V}'_i$ ) и эллипсами СКО на рис. 2в (сплошная линия — измерения, пунктир — расчет). Графики рядов  $\vec{V}(t)$  и  $\vec{V}'_i(t)$  демонстрируют хорошее качество воспроизведения дрейфа регрессией (1) для обоих массивов данных. Еще нагляднее это проявляется при сопоставлении вероятностных характеристик — эллипсы СКО измеренных и вычисленных скоростей

Таблица 3

Дата начала, окончания и источник данных		Оценки компонентом и инвариантов параметров векторной регрессии дрейфа по ветру												
		Компоненты						Инварианты						Модуль и направление
		тензора регрессии $A_{WU}$												$\bar{B}_{WU}$
		$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{21}$	$a_{22}$	$I_1$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$D$	$\chi$	$\alpha$	$B$	$\Phi_{\bar{B}}$	
18.10.2007– 08.07.2008	А	1,53	-0,89	0,79	1,48	3,01	1,58	1,33	-1,68	0,93	147	1,31	228	
21.12.2007– 08.07.2008	А Б	1,53 1,42	-0,78 -0,71	0,68 0,66	1,44 1,30	2,97 2,72	1,55 1,42	1,42 1,30	-1,46 -1,37	0,91 0,91	157 169	2,12 1,52	233 236	
18.10.2007– 21.12.2007	А	1,42	-1,14	0,91	1,84	3,26	1,75	1,41	-2,05	0,74	104	2,06	73	
21.12.2007– 14.02.2008	А Б	1,63 1,42	-0,62 -0,73	0,74 0,72	1,48 1,39	3,11 2,80	1,65 1,42	1,46 1,38	-1,36 -1,45	0,88 0,97	198 164	2,49 1,41	293 313	
15.02.2008– 15.05.2008	А Б	1,33 1,18	-0,66 -0,53	0,82 0,75	1,34 1,16	2,67 2,54	1,42 1,28	1,25 1,26	-1,48 -1,28	0,89 0,83	225 223	3,20 2,79	228 229	
16.05.2008– 08.07.2008	А Б	1,34 1,44	-0,88 -0,61	0,45 0,70	1,03 1,00	2,97 2,84	1,45 1,46	1,42 1,38	-1,33 -1,31	0,95 0,87	152 167	2,18 1,44	175 182	

для массива *Б* визуально неразличимы, а для массива *А* заметны только очень небольшие различия. Тесная сопряженность скоростей ветра и дрейфа и характер их изменчивости позволяют считать, что отмеченные на отдельных участках траектории различия являются проявлением в первую очередь временной нестационарности, а не пространственной неоднородности.

Инварианты тензора  $A_{\psi\psi}$  в табл. 3 использованы для характеристики пространственно-временных вариаций параметров регрессии и различий между массивами *А* и *Б*. Вариабельность параметров регрессии по участкам траектории существенно меньше соответствующих контрастов параметров изменчивости скорости дрейфа в табл. 2, а различия оценок инвариантов  $A_{\psi\psi}$  по данным *А* и *Б* на одном и том же отрезке траектории меньше пространственно-временных контрастов в каждом из двух массивов.

Количественная характеристика сопряженности скоростей ветра и дрейфа представлена в табл. 4 оценками показателей корреляции и коэффициента детерминации.

Таблица демонстрирует очень тесную связь изменений скоростей ветра и дрейфа. Общая корреляция составляет 0,89 (*Б*) и 0,80 ÷ 0,84 (*А*), так что линейная регрессия объясняет 80 % дисперсии  $\bar{V}_B$ . Коллинеарная и ортогональная корреляции всегда положительные; коллинеарная корреляция составляет 0,79 ÷ 0,82 (*Б*) и 0,67 ÷ 0,74 (*А*), ортогональная корреляция составляет 0,36 ÷ 0,41 для обоих массивов. Таким образом, зависимость обусловлена в большей части сопряженностью однонаправленных составляющих ветра и дрейфа и для массива *Б* несколько больше, чем для массива *А*. Поскольку  $r_{\perp} > 0$ , то дрейф развернут вправо от ветра, что согласуется с имеющимися представлениями. Поскольку  $r_{\downarrow} > r_{\perp}$ , то угол отклонения меньше 45°. Как и для табл. 3, отметим в табл. 4 небольшие (в сравнении с табл. 2) различия по участкам траектории дрейфа, причем для оценок *Б* значения показателей корреляции можно считать постоянными.

Для сопоставления масштабов пространственно-временной вариабельности параметров изменчивости, регрессии и корреляции между собой, а также для сравнения оценок по массивам данных *А* и *Б* в табл. 5 приведены значения безразмерного удельного размаха  $(\max - \min)/m$ , определенного как разность максимального и минимального (по участкам траектории дрейфа) значения параметра, нормированного на его среднее значение. Таблица убедительно подтверждает положение о сильной вариабельности параметров изменчивости и квазипостоянстве параметров регрессии и корреляции, т.е. характеристики регрессии и корреляции остаются стабильными, несмотря на сильные вариации параметров изменчивости скоростей ветра и дрейфа. Такое свойство регрессии более отчетливо проявляется в массиве *Б*.

Значения ветрового коэффициента  $k$  и угла отклонения ветра от дрейфа  $\psi$  использованы для сравнения ветрового дрейфа СП-35 с опубликованными многолетними обобщениями [9]. Оценки  $k$  и  $\psi$  получены по всей совокупности данных суточного разрешения, их средние значения приведены в табл. 6 ( $\psi > 0$  означает отклонение дрейфа вправо от ветра).

Таблица показывает исчезающе малые различия во времени и между массивами *А* и *Б*, совпадение с опубликованными данными практически идеальное (согласно [9] характерные значения в среднем составляют  $\bar{k} \cong 0,02$ ,  $\bar{\psi} = 30^\circ$ ).

Анализ всей совокупности оценок по среднесуточным данным показал, что общий диапазон  $k$  составляет 0,001 ÷ 0,029, при этом 90 % всех значений попало в диапазон 0,011 ÷ 0,020; общий диапазон  $\psi$  составляет 5 ÷ 97° (отрицательные значения не обнаружены), в диапазон 20 ÷ 40° попало 65 % всех значений, а в диапазон 10 ÷ 50° — 92 % всех значений. Все без исключения аномальные выбросы (10 % значений  $k$  и 8 % значений  $\psi$ ) зафиксированы при слабом ветре и медленном дрейфе.

Таблица 4

## Оценки показателей корреляции скоростей ветра и дрейфа и коэффициента детерминации

Дата начала, окончания и источник данных		Корреляция			Детерминация
		$r_{\uparrow\downarrow}$	$r_{\perp}$	$\mu$	$R_{\vec{v}}^2, \%$
18.10.2007–08.07.2008	А	0,74	0,41	0,84	72
21.12.2007–08.07.2008	А	0,75	0,37	0,84	71
21.12.2007–08.07.2008	Б	0,79	0,41	0,89	80
18.10.2007–21.12.2007	А	0,73	0,41	0,83	73
21.12.2007–14.02.2008	А	0,80	0,36	0,88	77
21.12.2007–14.02.2008	Б	0,79	0,41	0,89	80
15.02.2008–15.05.2008	А	0,67	0,38	0,78	60
15.02.2008–15.05.2008	Б	0,76	0,43	0,88	77
16.05.2008–08.07.2008	А	0,70	0,39	0,80	66
16.05.2008–08.07.2008	Б	0,82	0,36	0,89	82

Таблица 5

## Удельный размах характеристик изменчивости, регрессии и корреляции скорости дрейфа

Источник данных	Характеристики изменчивости								
	Модуль скорости			$m_{\vec{v}}$	СКО				$\gamma_d$
	$\vec{V}$	$\sigma$	max		$I_1$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\chi$	
А	0,26	0,41	0,35	0,40	0,37	0,34	0,45	0,31	0,30
Б	0,35	0,45	0,28	0,45	0,45	0,48	0,59	0,33	0,36

Источник данных	Инварианты тензора регрессии					Показатели корреляции			
	$I_1$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$D$	$\chi$	$r_{\uparrow\downarrow}$	$r_{\perp}$	$\mu$	$R_{\vec{v}}^2$
А	0,17	0,15	0,12	0,09	0,15	0,18	0,08	0,12	0,25
Б	0,18	0,13	0,10	0,13	0,11	0,08	0,17	0,01	0,06

Таблица 6

## Средние значения ветрового коэффициента и угла отклонения по среднесуточным значениям измеренной скорости ветра и расчетной скорости дрейфа

Дата начала, окончания	Источник данных			
	А		Б	
	$k$	$\psi$ , град.	$k$	$\psi$ , град.
18.10.2007–08.07.2008	0,018	28	–	–
21.12.2007–08.07.2008	0,018	29	0,017	27
18.10.2007–21.12.2007	0,018	28	–	–
21.12.2007–14.02.2008	0,019	27	0,016	25
15.02.2008–15.05.2008	0,018	32	0,018	31
16.05.2008–08.07.2008	0,018	26	0,016	28

### Реконструкция траектории ветрового дрейфа

Сравнение рядов скоростей дрейфа, вычисленных по данным измерений и рассчитанных по уравнению регрессии (1) на рис. 2а, и значения показателей корреляции из табл. 4 показывают хорошее согласие фактических и расчетных данных. Траектория чисто ветрового дрейфа может быть восстановлена пересчетом вычисленных векторов перемещения в широту и долготу. На рис. 1б, в рассчитанные по данным А и Б (тонкие линии) траектории наложены на карту реального дрейфа (толстые линии). Рисунок показывает почти идеальное воспроизведение расчетным ветровым дрейфом реального движения СП-35. Небольшие отклонения заметны только на отдельных участках и только для массива А. На врезке приведен в укрупненном масштабе отрезок траектории с 21.12.2007 по 31.01.2008. Видно, что даже здесь эти отклонения невелики, несмотря на то, что выбран участок с самыми сильными расхождениями. Отсюда следуют два вывода:

- генеральный дрейф СП-35 практически полностью определялся ветром;
- подтверждена возможность использования доступного массива координат с сайта ААНИИ для описания суммарного и ветрового дрейфа для траекторий значительной протяженности; для анализа более коротких отрезков и для расчетов повышенной точности измеренные значения широты и долготы должны иметь несколько десятичных знаков.

В общем случае при корреляции ветра и дрейфа меньше 1 фактическая и расчетная траектории дрейфа не будут совпадать, и это различие можно использовать для оценивания квазипостоянного неветрового течения. Рис. 1б, в показывает, что для СП-35 реальная и расчетная траектории совпали на всех участках трассы. Поэтому можно было бы предположить (но только для рассматриваемого района в рассматриваемый промежуток времени) отсутствие «постоянного» течения с характерным масштабом времени от первых недель до 10 месяцев. Однако этот предварительный вывод нуждается в дополнительном обосновании, т.к. траектория ветрового дрейфа СП-35 в целом совпадает с направлением трансарктического течения [9] (определенное различие между ними заметно только на конечном участке траектории после 15 мая 2008 г.). Косвенным доводом в пользу того, что квазипостоянное течение существует и примерно совпадает по направлению с ветровым дрейфом, являются оценки средних значений  $\bar{m}_\epsilon$  необъяснимых остатков  $\bar{\epsilon}_i$  из уравнения (1). Расчет по данным массива Б на месячных отрезках показал, что с 21.12.2007 по 15.05.2008 направления векторов  $\bar{m}_\epsilon$  близки к направлению среднего измеренного дрейфа из табл. 3, а модуль  $\bar{m}_\epsilon$  составляет  $1,0 \div 1,5$  см/с. В этом случае (при совпадении направлений ветрового дрейфа и квазипостоянного течения) может оказаться полезным независимый расчет скорости «постоянного» течения  $\bar{U}$ , например по динамическим картам (плотностные течения) и с учетом наклона уровенной поверхности, сформированного градиентом атмосферного давления («обратный барометр»).

В табл. 7 приведены диапазоны изменения широты и долготы фактических и снятых с траектории, рассчитанной по уравнению (1), и коэффициенты корреляции фактических и вычисленных координат на участках дрейфа различной (от 1 до 6,5 месяцев) продолжительности.

На рис. 3 представлены графики сопряженности измеренных и расчетных значений широты для отрезков продолжительностью 3 месяца и 1 месяц. Сопоставлены оценки по массивам А и Б. Основной смысл такого сопоставления состоит в уточнении ограничений, накладываемых погрешностями измерения и (или) задания координат – в массиве А координаты заданы с точностью до  $\pm 0,1^\circ$  по широте и по долготе, а в массиве Б точность на несколько порядков выше.

Табл. 7 показывает, что при изменении широты более, чем на  $1,5^\circ$  и при изменении долготы более, чем на  $10^\circ$  (продолжительность дрейфа 2 месяца и более)

Таблица 7

**Диапазон изменения координат и корреляция фактических и расчетных значений широты и долготы в зависимости от размеров траектории дрейфа**

Дата начала, окончания и источник данных		Широта			Долгота		
		min	max	$r$	min	max	$r$
21.12.2007–08.07.2008	<i>A</i>	81,1	85,7	0,9993	26,9	99,7	0,9999
	<i>B</i>	81,08487667	85,70002000	0,9998	26,90084500	99,78416000	0,9999
15.02.2008–15.05.2008	<i>A</i>	83,4	85,7	0,997	27,1	71,5	0,9999
	<i>B</i>	83,41674667	85,66752000	0,9997	27,05136333	71,58358000	0,9999
15.02.2008–15.04.2008	<i>A</i>	84,1	85,7	0,996	39,0	71,5	0,9998
	<i>B</i>	84,06739833	85,66752000	0,9995	39,05033333	71,58358000	0,9997
15.02.2008–15.03.2008	<i>A</i>	85,4	85,7	0,80	55,9	71,5	0,997
	<i>B</i>	85,43443167	85,66752000	0,998	56,06694833	71,58358000	0,998

корреляция фактических и расчетных координат практически не отличается от  $r = 1$ , хотя на графике (верхний ряд слева на рис. 3) уже обнаруживается некоторое ухудшение качества оценок по массиву *A*. Резкое ухудшение оценок по массиву *A* происходит для 1-месячного отрезка дрейфа, когда изменение широты составило около  $0,5^\circ$ , долготы – около  $5^\circ$ ; при этом качество оценки по массиву *B* ухудшается незначительно (последняя строка табл. 6 и нижний ряд на рис. 3). Следовательно,

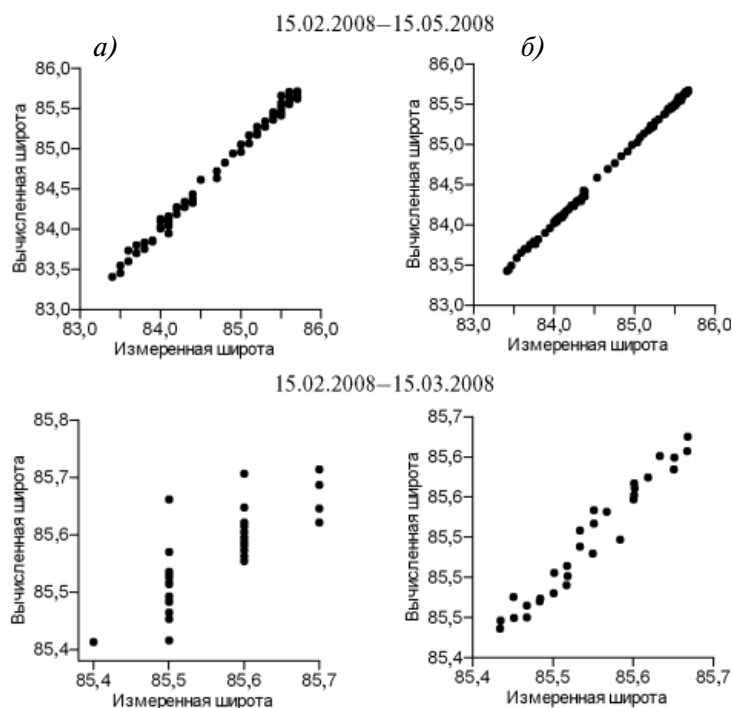


Рис. 3. Сопряженность фактических и расчетных значений широты по данным *A* (*a*) и *B* (*б*) на трехмесячном и одномесечном отрезках дрейфа СП-35

удовлетворительная точность оценок достигается при анализе отрезков, на которых величина смещения льдины превосходит погрешность задания координат не менее чем на порядок. Для массива  $A$  это означает перемещение льдины на  $100 \div 150$  км и более.

Обобщение всего исторического массива данных дрейфа станций «Северный полюс» предполагает анализ не только скоростей, но и траекторий дрейфа. Для этого необходимо использовать метод Лагранжа, в котором система координат связана с движущимся объектом, а положение этого объекта описывает радиус-вектор, а не пара чисел (широта и долгота). Используемая здесь методика применима и в этом подходе, т.к. она основана на правилах алгебры евклидовых векторов.

### ВЫВОДЫ

1. Выполнено статистическое оценивание характеристик скоростей дрейфа СП-35, ветра и их сопряженности на основе векторно-алгебраического метода. Изменчивость представлена двумерным (по модулю и направлению) распределением вероятностей, вектором средней скорости и инвариантами тензора СКО; тензор  $A_{\vec{w}\vec{v}}$ , вектор  $\vec{B}_{\vec{w}\vec{v}_i}$  в уравнении  $\vec{V}'_i = A_{\vec{w}\vec{v}}\vec{W}_i + \vec{B}_{\vec{w}\vec{v}_i}$  векторной линейной регрессии дрейфа по ветру и система показателей корреляции являются функционалами инвариантов тензоров дисперсии и взаимной дисперсии. Такой подход позволяет дать кинематическую интерпретацию результатов, учитывающую совокупное влияние изменений модуля и направления скорости, в отличие от покомпонентного метода, в котором СКО, ковариация, характеристики регрессии вводятся как матрицы с элементами, имеющими самостоятельное значение, т.е. искусственно разрывается связь внутри единой характеристики – матрицы соответствующего тензора.

2. Для дрейфа СП-35 имеется 2 источника данных. В массиве  $A$  приведены значения координат (с точностью до  $0,1^\circ$ ) и ветра через 6 часов за все время работы СП-35; на сайте ААНИИ такие данные есть для всех СП (кроме СП-1). В массиве  $B$  приведены 1-минутные измерения координат (с формальной точностью до восьмого десятичного знака, надежные с 21.12.2007) и ветра. Данные  $B$  содержат неопределенность, связанную с неизвестной реальной точностью измерения координат, причем для каждого индивидуального измерения эта точность может быть различной.

Различная точность, наличие неопределенностей и необходимость сравнения оценок по двум видам данных и учета приливных колебаний предполагает специальную подготовку данных. Скорости дрейфа вычислены по координатам, разнесенным на время  $\Delta t$ , значительно превышающее дискретность измерений, сглажены скользящим осреднением и после этого осреднены за сутки. Среднесуточная скорость ветра получена по минутным измерениям. Поскольку точность обсерваций и характерные скорости дрейфа на различных СП не одинаковы, для каждой из них конкретные значения  $\Delta t$  и периода сглаживающего осреднения необходимо уточнять индивидуально.

3. Сопоставление оценок изменчивости указывает в первую очередь на согласованность изменений ветра и дрейфа и взаимоподобие характеристик скоростей дрейфа по массивам  $A$  и  $B$ . Распределения вероятностей одномодальные, моды составляют для ветра  $135 \div 180^\circ$  по направлению,  $3 \div 5$  м/с по модулю, для дрейфа  $180 \div 270^\circ$  по направлению,  $5 \div 15$  см/с по модулю. Распределение скорости по массиву  $B$  более сосредоточенное, чем по массиву  $A$ . Средняя скорость дрейфа развернута на  $20 \div 25^\circ$  вправо от ветра. Значения модулей и направлений средних и максимальных скоростей дрейфа (после сглаживания и суточного осреднения) составляют – в среднем  $241^\circ$  и  $4,1$  см/с в массиве  $A$ ,  $245^\circ$  и  $3,4$  см/с в массиве  $B$ , максимально –  $26,6$  см/с и  $24,3$  см/с. Размеры эллипсов СКО существенно превосходят длину векторов средней скорости, и все три процесса неустойчивые ( $\nu > 1$ ). Общая изменчивость у  $\vec{V}'_A$  несколько больше, чем у  $\vec{V}'_B$ , а по форме и ориентации эллипсы  $\sigma_{\vec{V}'_A}$  и  $\sigma_{\vec{V}'_B}$  практически не различаются. Оценки отношения  $\gamma_d$  показывают соизмери-

мый для оценок  $A$  и  $B$  вклад изменений модуля и направления в общую дисперсию. При переходе от одного участка траектории к другому происходит сильное изменение всех параметров, кроме  $\gamma_d$ , при этом изменения ветра и дрейфа взаимно согласованы.

4. Векторная корреляция представлена системой показателей корреляции  $r_{\uparrow\downarrow}$ ,  $r_{\perp}$ ,  $\mu$  и коэффициентом детерминации  $R_V^2$ . Оценки  $r_{\uparrow\downarrow}$ ,  $r_{\perp}$ ,  $\mu$  указывают на тесную связь изменений скоростей ветра и дрейфа, особенно для массива  $B$  —общая корреляция составляет 0,89 ( $B$ ) и 0,80  $\div$  0,84 ( $A$ ), так что линейная регрессия объясняет 80 % дисперсии  $\vec{V}_B$ . Коллинеарная и ортогональная корреляции всегда положительны; коллинеарная корреляция сильнее ортогональной — 0,79  $\div$  0,82 против 0,36  $\div$  0,41. Уравнение линейной регрессии  $\vec{V}'_i = A_{\vec{W}}\vec{W}_i + \vec{B}_{\vec{W}_i}$  воспроизводит все видимые особенности изменчивости скорости дрейфа. Значения всех характеристик регрессии и корреляции на различных участках дрейфа почти одинаковы для массива  $A$ , а для массива  $B$  практически неразличимы, несмотря на сильные вариации характеристик изменчивости.

5. Сильная корреляция показывает, что генеральный дрейф СП-35 определялся прежде всего ветром, что дополнительно подтверждается почти идеальным совпадением траекторий фактического результирующего и расчетного ветрового дрейфа. Для СП-35 сложность разделения чисто ветрового дрейфа и дрейфа, обусловленного квазипостоянным течением, не связанного с локальным ветром, обусловлена взаимной согласованностью направлений дрейфа и трансарктического течения. Оценки по средним значениям (на месячных отрезках)  $\vec{m}_e$  необъяснимых остатков в уравнении регрессии (1) дают диапазон значений модуля скорости неветровой составляющей дрейфа 1,0  $\div$  1,5 см/с, при том, что модуль средней скорости суммарного дрейфа изменяется в диапазоне 4,5  $\div$  6 см/с.

6. Сопоставление оценок по более точным 1-минутным наблюдениям из массива  $B$  и по 6-часовым наблюдениям из массива  $A$  с точностью задания координат  $\pm 0,1^\circ$  показало их взаимную согласованность. Различия между оценками характеристик изменчивости, регрессии и корреляции по различным участкам траектории дрейфа СП-35 заметно больше, чем между массивами  $A$  и  $B$  на одном участке. Это обосновывает возможность использования данных сайта [10] для детального анализа дрейфа всех станций «Северный полюс» начиная с СП-2.

*Авторы выражают искреннюю признательность зимовочному составу станции СП-35.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 264 с.
2. Гудкович З.М. К изучению дрейфа ледяного острова «Т-3» // Проблемы Арктики и Антарктики. 1964. Вып. 17. С. 30–35.
3. Гудкович З.М. Корреляционный метод обработки наблюдений над течениями // Проблемы Арктики и Антарктики. 1965. Вып. 21. С. 56–60.
4. Иванов Н.Е. О характеристиках корреляции скоростей ветра, морских течений и дрейфа льда // Метеорология и гидрология. 2004. № 8. С. 61–72.
5. Клеванцов Ю.П., Микулинская С.М., Рожков В.А. Об анализе векторов скорости морских течений // Метеорология и гидрология. 1996. № 9. С. 96–105.
6. Кочин Н.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 425 с.
7. Обухов А.М. Нормальная корреляция векторов // Известия АН СССР. 1939. № 3. С. 339–369.
8. Обухов А.М. Теория корреляции векторов // Ученые записки МГУ. 1945. Вып. 45. С. 73–92.



9. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Радионов В.Ф., Тимохов Л.А., Широков А.В. Научные исследования в Арктике. Т. 1. Научно-исследовательские дрейфующие станции «Северный полюс». СПб.: Наука, 2005. 267 с.

10. URL: <http://www/aari.nw.ru/projects/ecimo/index.php> [дата обращения 2.02.2011].

N.E.IVANOV, A.A.VISNEVSKY, V.T.SOKOLOV

### WIND DRIFT OF THE DRIFTING STATION «NORTH POLE-35»

*The drift of the drifting station «North pole-35» (NP-35) during October 2007 – July 2008 has been analyzed. Parameters of variability and indexes of vector correlation between wind and sea ice drift have been estimated with vector-algebraic method in the invariant form, regression of drift velocity on wind has been calculated follow theory of A.M.Obukhov. It has been revealed that drift of NP-35 in great degree is determined by wind, its total correlation is about 0,9, and calculated trajectory sufficiently reproduces observed drift. The algorithm for calculation of drift velocity by coordinates, accounting time discreteness and inaccuracy of input data, is presented. The capability to use AARI archive for analysis of whole historical data set about drift of drifting stations «North pole» is shown.*

*Keywords:* sea ice wind drift, drift velocity, wind velocity, vector regression, indexes of vector correlation.