

УДК 551.506.5:551.501.45

СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ АТМОСФЕРНЫХ РЕАНАЛИЗОВ XX ВЕКА С РЕЗУЛЬТАТАМИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЭКСПЕДИЦИИ Г.Л. БРУСИЛОВА НА СУДНЕ «СВ. АННА» ВО ВРЕМЯ ВЫНУЖДЕННОГО ДРЕЙФА 1912–1914 ГГ.

© 2024 г. Р. И. Май^{a, b, *}, С. В. Цедрик^b, Е. О. Ермолов^c

^aКрыловский государственный научный центр, Московское шоссе, 44, Санкт-Петербург, 196158, Россия

^bСанкт-Петербургский государственный университет,
10 линия В.О., д. 33–35, Санкт-Петербург, 199178, Россия

^cФГБУ «Национальный парк «Русская Арктика», наб. Северной Двины, д. 36, Архангельск, 163069, Россия

*e-mail: rimay@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2024 г.

После доработки 06.05.2024 г.

Принята к публикации 10.07.2024 г.

В статье приведены результаты сравнения атмосферных реанализов XX века ERA-20C и NOAA-CIRES-DOE 20th Century Reanalysis Version 3 с данными метеорологических наблюдений, выполненных в ходе вынужденного дрейфа шхуны «Св. Анна» в 1912–1914 гг в Арктике. Сравнивались синхронные временные ряды атмосферного давления, температуры воздуха, скорости и направления ветра с помощью корреляционного анализа и оценок средней и среднеквадратической ошибки. Сравнение данных о ветре проводилось с помощью специализированных методов анализа векторных рядов. Для всех метеорологических характеристик реанализ NOAA-CIRES-DOE 20th Century Reanalysis Version 3 показывает более высокие значения корреляции и наименьшие значения среднеквадратической ошибки. Минимальные значения средней ошибки для данных атмосферного давления и температуры воздуха показывает реанализ ERA-20C. Установлено, что между данными измерений ветра и ветром реанализов есть систематическое отклонение примерно 12–15°.

Ключевые слова: реанализы двадцатого века, верификация, «Святая Анна», корреляция векторов, среднеквадратическая ошибка векторов

DOI: 10.31857/S0002351524050103 **EDN:** HXQRKO

1. ВВЕДЕНИЕ

Шхуна «Св. Анна», совершавшая под руководством Г.Л. Брусилова промысловый рейс, в октябре 1912 г. оказалась в ледовом плену у побережья п-ва Ямал и совершила двухлетний вынужденный дрейф из Карского моря в Арктический бассейн. Оказавшись севернее Земли Франца-Иосифа, 14 апреля 1914 г. часть команды во главе со штурманом В.И. Альбановым решила по льду добраться до архипелага и ожидать там помощи. До Земли Франца-Иосифа из 11 добралось только два человека, где они случайно встретили экспедицию на судне «Св. Фока» и были спасены. Дальнейшая судьба судна «Св. Анны» и оставшегося на ней экипажа неизвестна до сих пор.

Выписка из вахтенного журнала, метеорологические наблюдения и результаты промеров глубин, выполненные во время дрейфа, которые удалось сохранить, были опубликованы отдельным изданием как приложение к журналу «Записки по гидрографии» [Брейтфус, 1914]. Несмотря на то, что экспедиция Г. Л. Брусилова не имела научных задач, а попутные измерения, выполненные в ходе вынужденного дрейфа, не считались идеальными даже по нормам начала прошлого века [Брейтфус, 1914], результаты анализа полученных данных позволили совершить ряд выдающихся научных открытий. По записям промеров глубин были получены важные сведения о рельефе дна Карского моря: в частности, был открыт глубоководный жёлоб Св. Анны [Визе, 1931].

В.Ю. Визе систематизировал гидрометеорологическую информацию из вахтенного журнала судна «Св. Анна» и сравнил ее с особенностями траектории дрейфа. По результатам такого анализа В.Ю. Визе предположил, что на широтах $78-80^{\circ}$ с.ш. к востоку от траектории дрейфа «Св. Анна» находится неизвестная земля [Визе, 1924]. Впоследствии, в 1930 г специальная экспедиция на ледокольном пароходе «Георгий Седов», действительно обнаружила рядом с указанным районом землю, в дальнейшем получившую название Земля Визе или о. Визе. Открытие о. Визе стало, по-видимому, единственным успешным географическим открытием, совершенным на основе теоретического анализа гидрометеорологической информации.

Данные экспедиции Г.Л. Брусилова 1912–1914 гг. представляют научный интерес и сейчас. Метеорологические измерения могут быть использованы для косвенной оценки качества ретроспективного анализа (реанализа) метеорологических и ледовых полей начала XX века, выполненного с помощью численных моделей.

Атмосферные реанализы используются для задания вынуждающих сил в численных гидродинамических моделях океана, воспроизведения динамики льда, исследования характеристик погоды и климата, нахождения эмпирических зависимостей между параметрами атмосферы и других оболочек Земли. Как правило, атмосферные реанализы охватывают временной отрезок со второй половины XX века по настоящее время, т.е. отрезок времени, когда была развернута широкая сеть метеорологических станций. Такие реанализы сравниваются с современными независимыми измерениями, например: [Кулаков и др., 2013], [Jonassen, et al, 2019], [Демчев и др., 2020], [King, 2022].

В то же время существуют специальные атмосферные реанализы, охватывающие полностью XX век. По этим данным проводятся исследования изменения климата (например, [Latonin et al, 2021]). Информация из реанализов погоды XX века позволит восстановить гидрометеорологические условия, сопровождавшие русские арктические экспедиции 1912–1914 гг. (в том числе, рассчитать неизвестную траекторию дрейфа судна «Св. Анна» после апреля 1914 года), реконструировать погодные и ледовые условия катастроф в Арктике первой половины прошлого века.

Работ, посвященных верификации реанализов XX века в Арктике, по понятным причинам, нет. Дошедшие до нас записи вахтенного журнала судна «Св. Анна» позволяют по независимым данным оценить качество реанализов в полярных районах, где в то время не проводилось никаких метеорологических измерений.

Основная цель нашей статьи — сопоставить измерения метеорологических параметров, выполненных в ходе вынужденного дрейфа шхуны «Св. Анна», с данными реанализов XX века, и по результатам этого сравнения выбрать источники гидрометеорологической информации для воспроизведения дальнейшего дрейфа шхуны «Св. Анна», оценки условий ледового плавания начала XX века в морях европейского сектора Арктики. Сопутствующая цель данной работы — показать возможности сравнения векторных величин с помощью корреляции и расчета среднеквадратичной ошибки векторов.

2. МАТЕРИАЛЫ

2.1. Гидрометеорологическая информация из вахтенного журнала судна «Св. Анна»

На протяжении всего дрейфа на судне «Св. Анна» велся вахтенный журнал, куда записывалась метеорологическая информация. Полученные данные сохранились в документах, переданных штурманом В.И. Альбановым в Гидрографическое управление, и были опубликованы отдельной работой [Брейтфус, 1914].

Метеорологическая информация представляет собой результаты измерений атмосферного давления, скорости и направления ветра по трём срокам: 7:00, 13:00, 21:00 (до 1 ноября 1912 года измерения проводились в 6:00, 12:00, 20:00) за каждый день дрейфа. На каждые сутки давалась средняя температура воздуха. В ряде случаев для точки наблюдений определены координаты и измерена глубина моря. Согласно информации, опубликованной в работе [Брейтфус, 1914], для наблюдения за ветром использовался ручной анемометр, за атмосферным давлением — барометр-анероид. Измерения по барометрам проводились к 0°, температура прибора не наблюдалась. Температура воздуха измерялась по термометру со шкалой, разбитой по градусам Реомюра, сведений о положении его на судне и поправках не имеется. Ниже -35° по Реомюру (-43.75°C) температура не наблюдалась, так как ниже этого

значения шкала термометра разграфлена не была [Брейтфус, 1914].

В общей сложности за время дрейфа было проведено 1730 измерений атмосферного давления, 1667 измерений скорости и направления ветра, 579 измерений среднесуточной температуры воздуха, 108 полных определений координат судна, 316 промеров глубин (рис. 1). В вахтенном журнале, кроме указания произведённых работ, приводится общее качественное описание состояния погоды и окружающего ледяного покрова.

Вся гидрографическая и гидрометеорологическая информация, опубликованная в [Брей-

тфус, 1914], нами была оцифрована и занесена в электронную базу данных. Значения температуры переведены в градусы Цельсия, атмосферное давление — в гектопаскали, направление ветра переведено из указания румба в градусы.

2.2. Атмосферные реанализы XX века

NOAA-CIRES-DOE 20th Century Reanalysis Version 3

Реанализ NOAA-CIRES-DOE 20th Century Reanalysis Version 3 (далее NCD 20CR) охватывает отрезок времени с 01.01.1836 по 31.12.2015, предоставляя срочные, среднесуточные и сред-

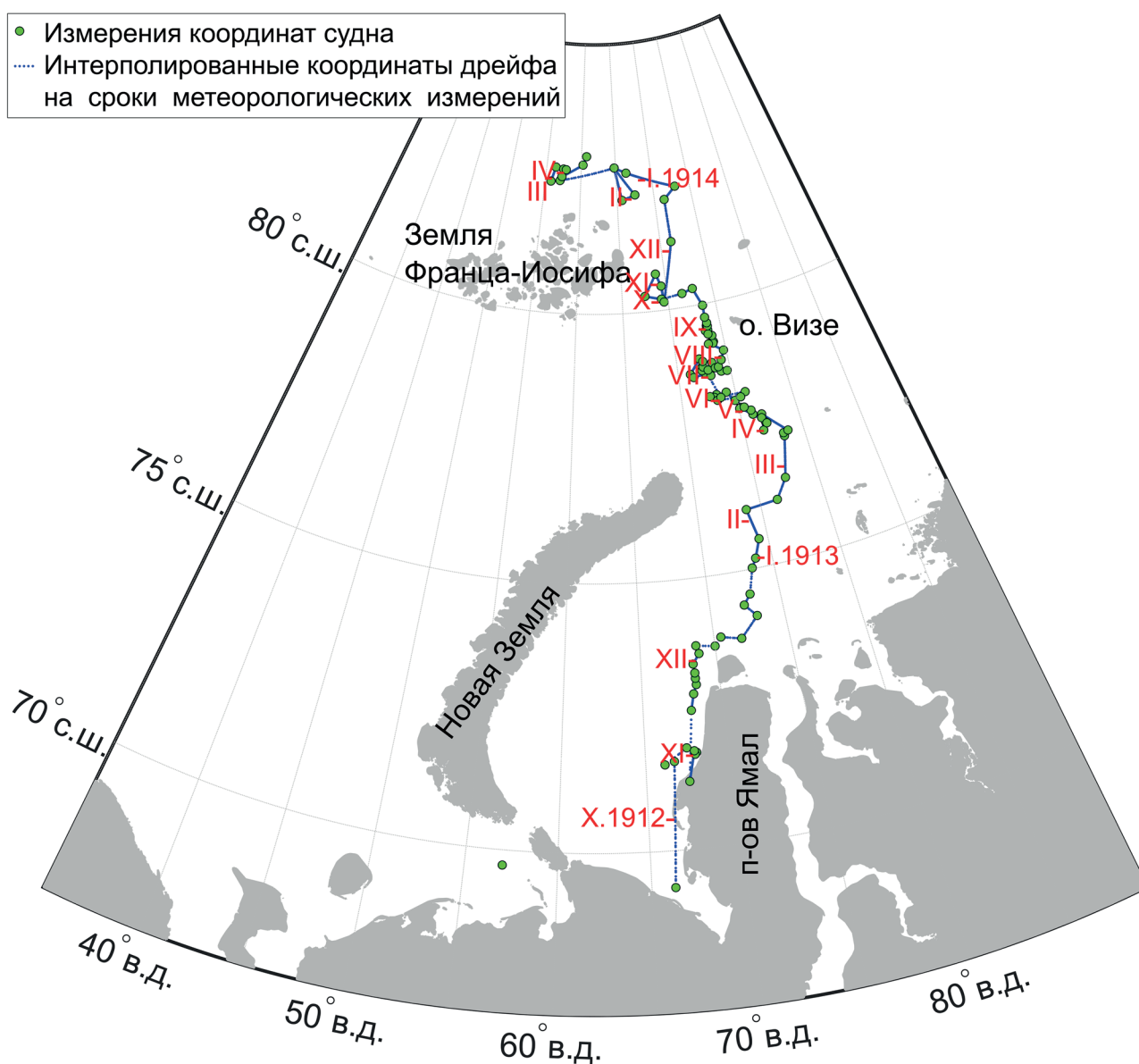


Рис. 1. Карта дрейфа шхуны «Св. Анна» в 1912–1914 гг.

немесячные данные, определяемые путём осреднения ансамбля из 80 реализаций. При создании реанализа использовались модели NCEP Global Forecast System (GFS) v14.0.1 с рядом корректировок и установкой граничных условий. В модели усваивалась информация об атмосферном давлении из проекта ISPD v. 4.7. (International Surface Pressure Databank). Пространственный шаг реанализа составляет 1° широты на 1° долготы глобальной сетки [Compo et al, 2011].

ERA-20C

Реанализ ERA-20C — продукт исследовательского проекта ERA-CLIM, основанный на реализации модели ECMWF Integrated Forecasting System (IFS) версии Cy38r1. Система IFS включает в себя модель общей циркуляции атмосферы, модель поверхности суши и термодинамическую модель льда. В данном реанализе усваиваются наблюдения за поверхностным атмосферным давлением и приповерхностными ветрами (базы данных ISPDv3.2.6 и ICOADSv2.5.1). Реанализ ERA-20C предоставляет срочные, а также синоптические, среднемесячные и среднесуточные данные на всём земном шаре с 1900 по 2010 годы. Пространственное разрешение реанализа составляет 1° по широте и долготе. Валидация реанализа

ERA-20C уже проводилась ранее, и её результаты приведены, в частности, в статье [Poli et al, 2016].

3. МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ ДАННЫХ

Каждому измерению метеорологических параметров с помощью пространственно-временной интерполяции координат положения судна присвоены широта и долгота. В этом случае предполагается, что судно дрейфует прямолинейно (но не равномерно за счет интерполяции во времени) между известными координатами. Для каждой полученной точки дрейфа линейно интерполировалась соответствующая метеорологическая информация из атмосферных реанализов. С помощью описанных процедур удалось получить синхронные векторные (ветер) и скалярные (атмосферное давление и среднесуточная температура воздуха) ряды измерений и атмосферных реанализов NCD 20CR и ERA-20C (рис. 2).

Как правило, в работах, посвященных верификации реанализов [Jonassen et al, 2019], [King, 2022], используются средняя ошибка (ME или bias), среднеквадратическая ошибка (root-mean-square error (RMSE)) и коэффициент корреляции. В работах [Кулаков и др., 2013] и [Демчев и др., 2020] вместо RMSE оценивалось среднеквадратическое отклонение разности измерений и данных

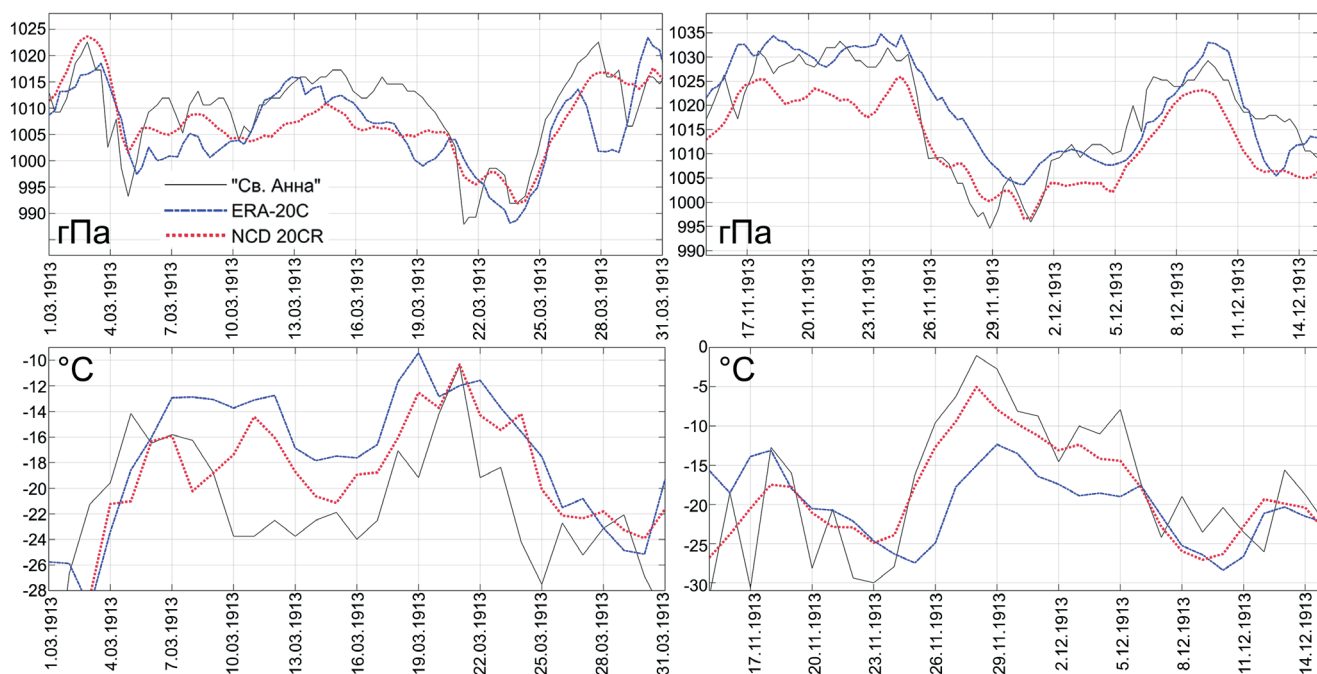


Рис. 2. Пример временных рядов атмосферного давления и температуры воздуха по судовым наблюдениям на шхуне «Св. Анна» и данным атмосферных реанализов NCD 20CR и ERA-20C.

реанализа. Мы также будем использовать перечисленные параметры: для сравнения скалярных рядов рассчитывался коэффициент парной корреляции и его значимость по критерию Стьюдента, средняя (ME) и среднеквадратическая ошибка (mean-square error (MSE)) или корень из MSE (RMSE). Указанные процедуры сопоставления скалярных величин являются стандартными и не требуют дополнительных разъяснений. Методы сравнения векторных временных рядов рассмотрим подробнее.

Корреляция векторов

Корреляция двух векторов $\vec{N} = [u_{\vec{N}}, v_{\vec{N}}]$ и $\vec{M} = [u_{\vec{M}}, v_{\vec{M}}]$, где u и v — проекции векторов на ортогональные оси, определяется по следующим формулам [Белышев, Клеванцов, Рожков, 1983], [Иванов, 2004]:

$$r_{\parallel} = \frac{I_1^{\vec{N}\vec{M}}}{\sqrt{I_1^{\vec{N}} I_1^{\vec{M}}}}, \quad (1)$$

$$r_{\perp} = \frac{J_1^{\vec{N}\vec{M}}}{\sqrt{I_1^{\vec{N}} I_1^{\vec{M}}}}, \quad (2)$$

где $r_{\parallel}$ — коллинеарный коэффициент корреляции, $r_{\perp}$ — ортогональный коэффициент корреляции, I_1 и J_1 — линейные инварианты тензоров дисперсии $D_{\vec{N}}$, $D_{\vec{M}}$, $D_{\vec{N}\vec{M}}$, равные сумме главной диагонали тензора и разности побочной диагонали тензора, соответственно.

$$D_{\vec{N}} = \begin{pmatrix} \text{cov}(u_{\vec{N}}, u_{\vec{N}}) & \text{cov}(u_{\vec{N}}, v_{\vec{N}}) \\ \text{cov}(v_{\vec{N}}, u_{\vec{N}}) & \text{cov}(v_{\vec{N}}, v_{\vec{N}}) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$D_{\vec{M}} = \begin{pmatrix} \text{cov}(u_{\vec{M}}, u_{\vec{M}}) & \text{cov}(u_{\vec{M}}, v_{\vec{M}}) \\ \text{cov}(v_{\vec{M}}, u_{\vec{M}}) & \text{cov}(v_{\vec{M}}, v_{\vec{M}}) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$D_{\vec{N}\vec{M}} = \begin{pmatrix} \text{cov}(u_{\vec{N}}, u_{\vec{M}}) & \text{cov}(u_{\vec{N}}, v_{\vec{M}}) \\ \text{cov}(v_{\vec{N}}, u_{\vec{M}}) & \text{cov}(v_{\vec{N}}, v_{\vec{M}}) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $\text{cov}(\)$ — ковариация соответствующих компонент векторов.

В работе [Иванов, 2004] введен дополнительный параметр μ , названный индикатором векторной корреляции:

$$\mu = \sqrt{r_{\parallel}^2 + r_{\perp}^2}. \quad (6)$$

Также введем параметр $\alpha_{\mu} = \arctg\left(\frac{r_{\perp}}{r_{\parallel}}\right)$, показывающий угол отклонения системы координат, при котором векторные ряды имели бы наибольший индикатор векторной корреляции [May, 2018]. То есть, если систему координат векторов $\vec{M}$ повернуть на угол α_{μ} вправо от оси u , то в этом случае коллинеарный коэффициент корреляции примет максимальные значения $r_{\parallel} = \mu$, а ортогональный коэффициент корреляции будет равен нулю ($r_{\perp} = 0$). На наш взгляд, использование пары коэффициентов μ и α_{μ} более удобно, нежели $r_{\parallel}$ и $r_{\perp}$. Коррелированные и синхронные по направлению векторные ряды должны иметь индикатор векторной корреляции μ , равный единице, и угол поворота системы координат α_{μ} , равный нулю.

Среднеквадратическая ошибка векторов (MSE)

Помимо корреляции необходимо также оценить степень расхождения векторных рядов по величине ($\vec{R} = \vec{N} - \vec{M} = [u_{\vec{R}}, v_{\vec{R}}]$, где $v_{\vec{R}} = v_{\vec{N}} - v_{\vec{M}}$, $u_{\vec{R}} = u_{\vec{N}} - u_{\vec{M}}$). Для векторных процессов среднеквадратическая ошибка ($MSE = \frac{\sum \vec{R}^2}{L}$, где L — длина ряда) будет представлять собой комбинацию квадрата математического ожидания $m_{\vec{R}}$ и дисперсии $D_{\vec{R}}$ расхождения «верифицируемых» и «истинных» векторных рядов ($\vec{R}$). Вектор математического ожидания $m_{\vec{R}}$ будет показывать систематическую ошибку, а эллипс дисперсии $D_{\vec{R}}$ будет описывать случайную ошибку. Вектор $m_{\vec{R}}$ можно представить в виде модуля M_{ME} и направления D_{ME} .

Дисперсия векторного ряда ($D_{\vec{R}}$) определяется симметричным диадным тензором, у которого в матричной форме записи на главной диагонали стоят дисперсии проекций вектора ($\text{cov}(u_{\vec{R}}, u_{\vec{R}})$, $\text{cov}(v_{\vec{R}}, v_{\vec{R}})$), а в верхнем и нижнем углах расположены ковариации ($\text{cov}(u_{\vec{R}}, v_{\vec{R}})$, $\text{cov}(v_{\vec{R}}, u_{\vec{R}})$) между компонентами дрейфа:

$$D_{\vec{R}} = \begin{pmatrix} \text{cov}(u_{\vec{R}}, u_{\vec{R}}) & \text{cov}(u_{\vec{R}}, v_{\vec{R}}) \\ \text{cov}(v_{\vec{R}}, u_{\vec{R}}) & \text{cov}(v_{\vec{R}}, v_{\vec{R}}) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Причем, ориентация вектора $m_{\vec{R}}$, ориентация и сжатие эллипса $D_{\vec{R}}$ говорят об особенностях различий «верифицируемых» и «истинных» векторов. Удобно дисперсию векторных процессов описывать через инварианты тензора дисперсии, которые соответствуют параметрам эллипса — величины полуосей эллипса дисперсии:

$\lambda_{1,2} = \frac{I_1 \pm \sqrt{I_1^2 - 4 \cdot \det D_{\vec{R}}}}{2}$, где I_1 — сумма главной диагонали тензора $D_{\vec{R}}$ и $\det D_{\vec{R}}$ — определитель матрицы тензора дисперсии. Направление большой оси эллипса дисперсии $\pm$ определяется из соотношения

$$\tan(2\alpha) = \frac{\text{cov}(v_{\vec{R}}, u_{\vec{R}}) + \text{cov}(u_{\vec{R}}, v_{\vec{R}})}{\text{cov}(v_{\vec{R}}, v_{\vec{R}}) - \text{cov}(u_{\vec{R}}, u_{\vec{R}})} \quad (8)$$

Идеально совпадающие векторные ряды имеют модуль вектора систематической ошибки $m_{\vec{R}}$, равный нулю, и эллипс случайной ошибки $D_{\vec{R}}$ со значениями осей, стремящимися к нулю.

Программная реализация на языке программирования MatLab описанных выше методов оценок векторной корреляции и среднеквадратических отклонений доступна по адресам: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/67326-rm_vec2cor <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/68275-the-vector-rmse>

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Коэффициенты корреляции между рядом атмосферного давления, измеренного в ходе дрейфа шхуны «Св. Анны», и соответствующими ему рядами данных реанализов составляют 0.61 для ERA-20C, и 0.85 для NCD 20CR. Эти коэффициенты корреляции получены для рядов, длиной 1730 значений, координаты которых получены интерполированием 108 пар широт и долгот, определённых на судне. При рассмотрении данных, соответствующих непосредственно измеренным координатам (108 значений), коэффициенты корреляции равны 0.63 и 0.86 для реанализов ERA-20C и NCD 20CR, соответственно. Допущение о прямолинейности траектории дрейфа между точками измерения координат судна незначительно влияет на результаты сравнения измеренных и моделируемых метеорологических параметров. Далее для верификации атмосферных реанализов использовались интерполированные координаты положения судна.

Чтобы исключить влияние сезонного хода на значение коэффициента корреляции временные ряды атмосферного давления и температуры воздуха разбивались на трёхмесячные отрезки, как это было сделано в работе [Кулаков и др, 2013]. Для удобства интерпретации трехмесячные отрезки соответствовали календарным сезонам. Все значения корреляции в табл. 1 и 2 статистически значимы.

Средняя ошибка (МЕ) атмосферного давления для всех временных отрезков меньше для европейского реанализа ERA-20C (значения МЕ лежат в пределах от -0.6 до 0.8 гПа), в то время, как средняя ошибка реанализа NCD 20CR всегда положительна (меняется в пределах от 0.7 гПа до 5.5 гПа). Примерно такой же порядок значений систематического отклонения можно отметить, сравнивая данные атмосферного давления реанализов NCD 20CR и ERA-20C.

Среднеквадратическая ошибка (RMSE) атмосферного давления меньше в информации реанализа NCD 20CR: она лежит в пределах от 6.6 до 9.2 гПа для различных сезонов, в то время, как среднеквадратическое расхождение между данными реанализа ERA-20C и наблюдениями экспедиции Брусилова превышает 8.2 гПа, достигая наибольших значений весной (12.5 гПа). Разброс данных об атмосферном давлении из реанализов относительно друг друга меньше, чем расхождение информации каждого из них с измерениями давления в 1912–1914 гг.

Как видно из табл. 1, коэффициент корреляции между измеренными рядами атмосферного давления и данными реанализа NOAA-CIRES-DOE 20th Century Reanalysis Version 3 для всех сезонов превышает значение 0.81, достигая максимума в осенний сезон ($r = 0.90$). В то время как корреляционная связь между измерениями и информацией реанализа ERA-20C составляет всего 0.5 для весны и лета и не превышает значения 0.69 зимой и осенью. Примечательно, что коэффициенты корреляции изменения атмосферного давления двух реанализов для указанных сезонов лежат в пределах 0.60–0.81. То есть атмосферное давление, измеренное на судне «Св. Анна», показывает более тесную связь с NCD 20CR, чем связь двух реанализов.

В табл. 2 приведены результаты сравнения среднесуточной температуры, измеренной в ходе

Таблица 1. Сравнение атмосферного давления, измеренного во время дрейфа шхуны «Св. Анна», с данными атмосферных реанализов NCD 20CR и ERA-20C

Временной отрезок	Длина ряда	NCD 20CR – измерения ME / RMSE (r)	ERA-20C – измерения ME / RMSE (r)	ERA-20C – NCD 20CR ME / RMSE (r)	СКО измерений гПа
Все данные	1730	2.8 / 7.7 (0.85)	0.1 / 11 (0.61)	2.7 / 8.2 (0.74)	13.2
Лето	276	3.5 / 6.5 (0.81)	0.5 / 8.2 (0.53)	3.0 / 6.8 (0.60)	9.1
Осень	481	5.5 / 9.2 (0.90)	0.8 / 11.3 (0.69)	4.7 / 8.9 (0.79)	15.6
Зима	539	1.7 / 7.6 (0.85)	–0.6 / 10.7 (0.64)	2.3 / 7.0 (0.81)	13.6
Весна	434	0.7 / 6.6 (0.82)	–0.1 / 12.5 (0.49)	0.8 / 9.3 (0.70)	11.6

дрейфа шхуны «Св. Анна», и воспроизведенных атмосферными реанализами XX века.

Средняя ошибка (ME) температуры воздуха в разные сезоны меняется в пределах от -2.1 до $+1.9$ °C для реанализа NCD 20CR и от 0 до $+1.6$ °C для реанализа ERA-20C. RMSE среднесуточной температуры реанализа NCD 20CR в разные сезоны меняется от 2.8 до 6.3 °C, что на $1-2$ °C меньше аналогичного параметра реанализа ERA-20C (2.6 и 8.1 °C). Оценки расхождения температуры воздуха реанализов относительно друг друга находятся в диапазоне от -2.7 до 0.3 °C для систематической ошибки (ME) и от 0.9 до 4.9 °C для среднеквадратической ошибки (RMSE).

Анализ корреляционных связей временных рядов изменения среднесуточной температуры показал, что наилучшее совпадение наблюдается между измеренными данными на судне и реанализом NCD 20CR (коэффициент корреляции меняется от 0.63 до 0.90, в зависимости от рассматриваемого сезона). Наименьшее значение коэффициентов корреляции между измеренной температурой и данными реанализа отмечается у ERA-20C: от 0.54 летом до 0.76 для календарной осени. При этом взаимная корреляция рядов

температуры двух реанализов для разных сезонов меняется в пределах от 0.77 до 0.88.

В табл. 1 и 2, помимо средней ошибки, среднеквадратической ошибки, коэффициентов корреляции показаны значения среднеквадратического отклонения (СКО) рядов наблюдений за атмосферным давлением и среднесуточной температурой воздуха, измеренных на судне «Св. Анна». Отношение СКО и RMSE можно представить в виде допустимой ошибки прогноза. Согласно [Наставление, 2011], для краткосрочных и среднесрочных (заблаговременность до 15 сут) прогнозов за критерий допустимой ошибки принимается величина, равная $0.674 \times \text{СКО}$; для долгосрочных прогнозов (заблаговременность от 15 сут до 6 мес) — $0.8 \times \text{СКО}$; для сверхдолгосрочных прогнозов (заблаговременность свыше 6 мес.) принимается величина, равная СКО.

Как видно из табл. 1 и 2, значение RMSE температуры воздуха двух рассматриваемых реанализов меньше допустимой погрешности, определенной для краткосрочного прогноза ($\text{RMSE} < 0.674 \times \text{СКО}$) для всех сезонов, за исключением летнего. Для летнего сезона отношение RMSE и СКО атмосферного давления реанализа NCD 20CR соответствует значениям,

Таблица 2. Сравнение температуры воздуха, измеренной во время дрейфа шхуны «Св. Анна», с данными атмосферных реанализов NCD 20CR и ERA-20C

Временной отрезок	Длина ряда	NCD 20CR – измерения ME / RMSE (r)	ERA-20C – измерения ME / RMSE (r)	ERA-20C – NCD 20CR ME / RMSE (r)	СКО измерений °C
Все данные	579	–0.7 / 5.2 (0.93)	0.8 / 6.9 (0.87)	–1.5 / 4.5 (0.94)	13.8
Лето	92	1.9 / 2.8 (0.63)	1.6 / 2.6 (0.54)	0.3 / 0.9 (0.77)	2.4
Осень	163	–2.1 / 5.1 (0.89)	0.6 / 6.5 (0.76)	–2.7 / 5.4 (0.84)	9.9
Зима	180	–1.5 / 6.3 (0.84)	0.0 / 8.1 (0.63)	–1.6 / 4.3 (0.79)	10.3
Весна	144	0.3 / 4.9 (0.90)	1.5 / 7.6 (0.75)	–1.3 / 4.9 (0.88)	10.9

удовлетворяющим качеству долгосрочных метеорологических прогнозов, погрешность этого реанализа для остальных сезонов соответствует требуемой точности, установленной для краткосрочных прогнозов. RMSE атмосферного давления реанализа ERA-20С только для осени и зимы соответствует допустимой погрешности долгосрочных прогнозов ($RMSE < 0.8 \times \text{СКО}$), для остальных сезонов RMSE атмосферного давления реанализа ERA-20С больше СКО, что даже не отвечает условиям допустимой погрешности сверхдолгосрочных прогнозов.

Индикатор векторной корреляции (μ) между измерениями на судне «Св. Анна» и реанализом NCD 20CR равен 0.63 для временных рядов без разделения на сезоны. Корреляция между наблюдениями за ветром с информацией реанализа ERA-20С существенно ниже: $\mu = 0.39$ При этом информация о ветре обоих реанализов коррелирует между собой с индикатором корреляции, равным 0.62, что сопоставимо со значениями индикатора векторной корреляции между измерениями на судне и данными реанализа NCD 20CR (табл. 3).

Примечательно, что угол отклонения системы координат α_μ , который обеспечивает максимальное значение коллинеарного коэффициента корреляции ($r_\parallel = \mu$), меняется в пределах от 6° до 25° , в среднем, 12° (примерно, один румб) при сравнении судовых наблюдений за ветром с данными любого из рассматриваемых реанализов. Параметр α_μ минимален при сравнении реанали-

зов NCD 20CR и ERA-20С между собой (табл. 3). Магнитное склонение, рассчитанное по модели IGRF (International Geomagnetic Reference Field Model), вдоль траектории дрейфа шхуны «Св. Анна» меняется в диапазоне $18\text{--}32^\circ$, следовательно, полученные значения α_μ нельзя полностью объяснить неучтенным магнитным склонением при проведении наблюдений за ветром.

Вектор систематической ошибки (M_{ME} , D_{ME}) и параметры эллипса случайной ошибки ($\sqrt{\lambda_1}$, $k_e = \frac{\sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{\lambda_1}}$) информации о ветре из реанализов NCD 20CR и ERA-20С представлены в табл. 3. Как видно из табл. 3, минимальная систематическая ошибка ($M_{ME} = 0.30$ м/с) отклонения ветра реанализа от измеренного на судне отмечается у реанализа NCD 20CR, аналогичный параметр реанализа ERA-20С составляет 0.79 м/с.

При разделении массива данных о ветре на сезоны можно увидеть, что систематическая ошибка векторов ветра, представленная реанализом ERA-20С, имеет значение 0.36 м/с летом. Это единственный показатель сравнения векторов ветра, по которому реанализ ERA-20С превзошел реанализ NCD 20CR, также это единственный случай, когда критерий верификации реанализа в теплый отрезок времени оказался лучше, чем в остальные сезоны. Отметим, что систематическое расхождение векторов ветра, измеренных на шхуне «Св. Анна», и данных реанализа NCD 20CR меньше, чем систематические расхождения векторов ветра двух реанализов. Случайная ошиб-

Таблица 3. Параметры средней и среднеквадратической ошибки векторов и корреляция векторов ветра, измеренного во время дрейфа шхуны «Св. Анна», и данных атмосферных реанализов NCD 20CR и ERA-20С. M_{ME} , D_{ME} – модуль (м/с) и направление ($^\circ$) систематической ошибки векторов, $\sqrt{\lambda_1}$ – величина (м/с) большой оси эллипса случайной ошибки векторов, k_e – коэффициент сжатия эллипса случайной ошибки векторов $k_e = \frac{\sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{\lambda_1}}$, μ – индикатор векторной корреляции, α_μ – угол поворота системы координат, при котором $\mu = r_\parallel$, $r_\perp = 0$

Временной отрезок	Длина ряда	NCD 20CR – измерения			ERA-20С – измерения			ERA-20С – NCD 20CR		
		RMSE		μ / α_μ	RMSE		μ / α_μ	RMSE		μ / α_μ
		M_{ME} / D_{ME}	$\sqrt{\lambda_1} / k_e$		M_{ME} / D_{ME}	$\sqrt{\lambda_1} / k_e$		M_{ME} / D_{ME}	$\sqrt{\lambda_1} / k_e$	
Все данные	1667	0.30 / 31	2.81 / 0.94	0.63 / 12	0.79 / 120	4.35 / 0.96	0.39 / 12	0.84 / 141	3.38 / 0.98	0.62 / 1
Лето	276	0.60 / –40	2.67 / 0.94	0.59 / 11	0.36 / –142	4.08 / 0.96	0.30/25	0.76 / 168	3.09 / 0.88	0.55 / 1
Осень	434	0.48 / 158	3.21 / 0.88	0.65 / 19	1.21 / 154	4.55 / 0.92	0.43 / 6	0.73 / 151	3.74 / 0.82	0.66 / –5
Зима	532	0.60 / 34	2.51 / 0.96	0.67 / 11	1.06 / 95	4.20 / 0.90	0.44 / 20	0.92 / 129	3.38 / 0.90	0.63 / 4
Весна	425	0.60 / 25	3.01 / 0.82	0.58 / 8	0.96 / 99	4.84 / 0.89	0.29 / 11	0.99 / 135	3.75 / 0.94	0.54 / 7

ка векторов представляет собой эллипс, характеризующийся длинами и ориентациями большой и малой осей. В табл. 3 показаны величина большой оси эллипса и коэффициент сжатия эллипса (отношение малой и большой осей эллипса). Как видно из таблицы, коэффициент сжатия эллипса случайной ошибки всегда больше 0,8, а значит, эллипс близок к окружности. По этой причине в работе не приведены азимуты ориентации осей эллипса.

Из табл. 3 видно, что данные реанализа NCD 20CR лучше совпадают с измерениями ветра на судне: большая ось случайной ошибки реанализа NCD 20CR всегда меньше 3,2 м/с, в то время как аналогичный параметр для данных реанализа ERA-20C всегда превышает 4 м/с. Эллипс случайной ошибки ветра реанализа ERA-20C в среднем в 1,5 раза превышает размеры эллипса ошибки реанализа NCD 20CR.

Для выявления закономерностей изменения во времени и пространстве степени соответствия данных наблюдений и реанализа был проведен

скользящий анализ с шириной окна 90 суток. Результаты анализа показаны на рисунке 3, где помимо значений ошибок и значений коэффициентов корреляции показаны области 95% доверительного интервала для каждой из оценок. Так как дрейф шхуны «Св. Анна» проходил преимущественно в северном направлении, то на рисунке 3 в качестве указателя пройденного расстояния размещена дополнительная информация о широте нахождения шхуны «Св. Анна» в соответствующий момент времени.

Рис. 3 в основном подтверждает оценки, представленные в табл. 1–3 для отдельных сезонов: для всех метеорологических параметров коэффициент корреляции максимален между измерениями и данными реанализа NCD 20CR, среднеквадратическая ошибка минимальна также у реанализа NCD 20CR, средняя ошибка рядов атмосферного давления минимальна у реанализа ERA-20C. Средняя ошибка температуры воздуха реанализа NCD 20CR меньше средней ошибки реанализа ERA-20C на отрезке дрейфа судна до

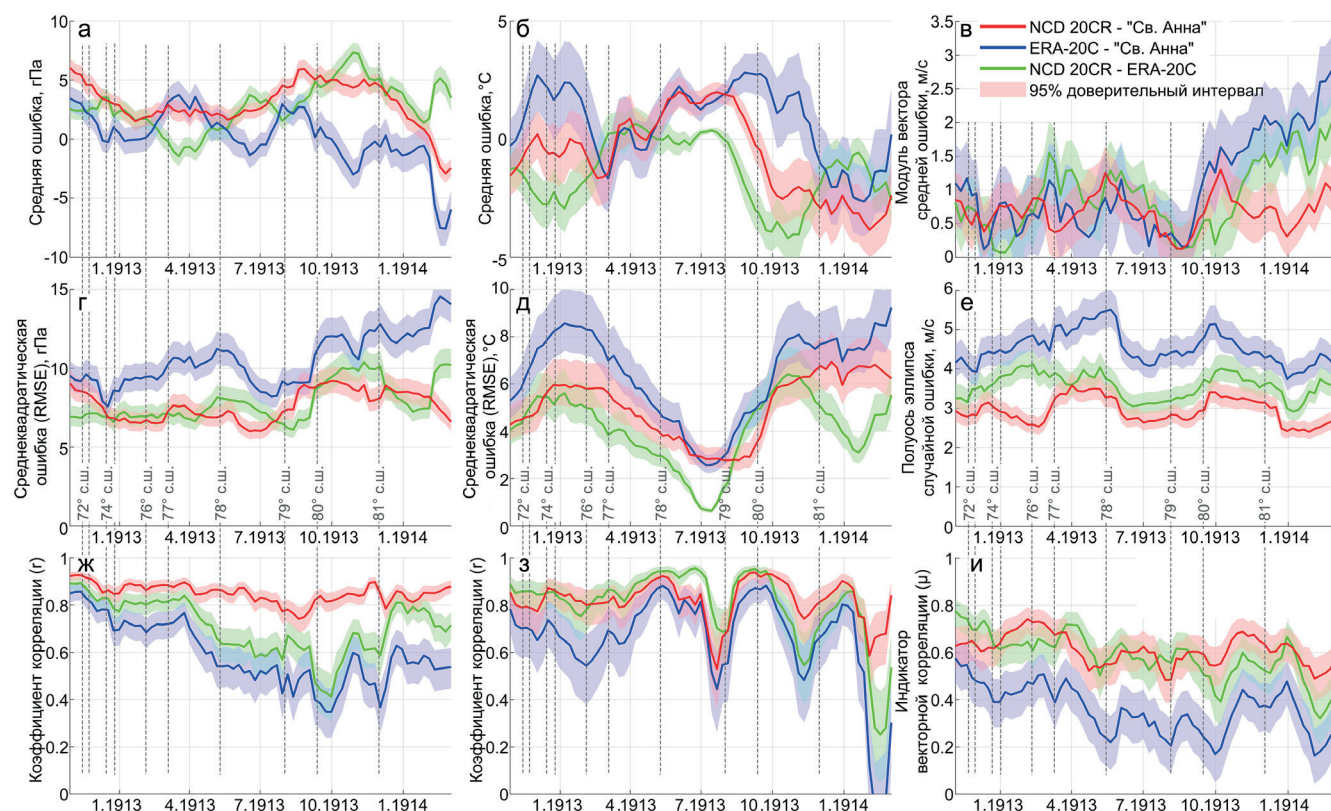


Рис. 3. Средняя ошибка (а–в), среднеквадратическая ошибка (г–е) и коэффициент корреляции (ж–и) временных рядов атмосферного давления (а, г, ж), температуры воздуха (б, д, з) и ветра (в, е, и) по судовым наблюдениям на шхуне «Св. Анна» и данным атмосферных реанализов.

широты 76° с.ш., затем до широты 81° с.ш. оба реанализа показывают сопоставимые значения средней ошибки, севернее 81° с.ш. абсолютное значение систематической ошибки реанализа ERA-20C несколько меньше. Южнее 80° с.ш. значения модуля вектора средней ошибки у обоих реанализов примерно одинаковы, севернее этой широты средняя ошибка ветра реанализа ERA-20C существенно увеличивается. Коэффициент корреляции между рядами измеренной температуры воздуха и данных обоих реанализов уменьшается в июле 1913 г., в летний временной отрезок отмечается уменьшение значения среднеквадратической ошибки (рис. 3).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исторические данные экспедиционных исследований в арктическом регионе могут быть полезны для исследования изменения климата, реконструирования гидрометеорологической обстановки прошлого, верификации атмосферных и океанских реанализов. Например, оцифрованная информация судового журнала шхуны «Св. Анна» (1912–1914 гг.) позволила нам оценить качество современных атмосферных реанализов XX века NCD 20CR и ERA-20C в акваториях Карского моря и европейского сектора Арктики. С помощью корреляционного анализа и расчета средней и среднеквадратической ошибки сравнивались атмосферное давление, среднесуточная температура и параметры ветра. Для сравнения информации о ветре необходимо использовать специализированные методы сравнения векторных рядов: корреляция векторов, среднеквадратическая ошибка векторов, которые более корректны по сравнению с подходом «вектор как скаляр» (статистический анализ модуля скорости ветра, направления ветра).

Представленные в статье результаты сравнения рядов наблюдений за метеорологическими параметрами во время вынужденного дрейфа экспедиции Л.Г. Брусилова на шхуне «Св. Анна» с информацией атмосферных реанализов XX века NCD 20CR и ERA-20C показали, что для температуры воздуха минимальное среднее отклонение отмечается у реанализа ERA-20C, среднеквадратическая ошибка обоих реанализов примерно одинаковая, но при этом, коэффициент корреляции изменения температуры воздуха выше у реанализа NCD 20CR. Данные атмосферного давления реанализа

NCD 20CR показывают положительную систематическую ошибку: 2–3 гПа, при средней ошибке реанализа ERA-20C, близкой к нулю. Остальные параметры (среднеквадратическая ошибка, коэффициент парной корреляции) указывают на то, что изменения атмосферного давления, измеренные в ходе дрейфа шхуны «Св. Анна», лучше воспроизводятся в результатах реанализа NCD 20CR. Все характеристики сравнения векторных рядов указывают на то, что данные реанализа NCD 20CR о ветре лучше совпадают с измеренными данными. Кроме того установлено, что между наблюдениями за ветром и данными обоих реанализов существует систематическое расхождение направлений ветров, оцененное нами в 12–15°.

Теснота связи данных реанализов NCD 20CR и ERA-20C между собой сопоставима с теснотой связи каждого из реанализов с рядами измерений экспедиции Л.Г. Брусилова. Это косвенно свидетельствует о том, что измерения, выполненные более чем 110 лет назад несовершенными приборами в критических для жизни человека условиях, отражают реальную гидрометеорологическую обстановку.

Показавший наилучшее совпадение с данными судовых метеорологических наблюдений за ветром реанализ NCD 20CR мы выбрали для ретроспективного анализа теоретического открытия о. Визе и восстановления предполагаемой судьбы шхуны «Св. Анна». Наши предварительные результаты моделирования дальнейшего дрейфа шхуны «Св. Анна», основанного на теории чисто ветрового дрейфа ледяного покрова, показали, что вопреки ожиданиям, шхуну в 1914 г. не вынесло в пролив Фрама. Ее траектория дрейфа описала дугу, и к лету 1915 г. «Св. Анна» опять приблизилась к Земле Франца-Иосифа [Tsedrik, 2023].

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеоиздат, 1983, 264 с.
- Брейтфус Л. Полярная экспедиция лейтенанта Г. Л. Брусилова на шхуне «Св. Анна». Петроград: Записки по гидрографии. Приложение к 4 Вып XXXVIII, 1914, 78 с.

- Визе В.Ю. К вопросу об островах в северной части Карского моря // Исследования морей СССР. Вып. 14. 1931. С. 155–169.
- Визе В.Ю. О поверхностных течениях в Карском море // Изв. Центр. Гидрометеорологического бюро. 1924. Вып. 3. С. 86–101.
- Демчев Д.М., Кулаков М.Ю., Макштас А.П., Махотина И.А., Фильчук К.В., Фролов И.Е. Верификация данных реанализов ERA-Interim и ERA5 о приповерхностной температуре воздуха в Арктике // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 36–46.
- Иванов Н.Е. О характеристиках корреляции скоростей ветра, морских течений и дрейфа льда // Метеорология и гидрология. 2004. № 8. С. 61–73.
- Кулаков М.Ю., Макштас А.П., Шутилин С.В. Верификация данных реанализа NCEP/NCAR по результатам наблюдений на дрейфующих станциях «Северный полюс» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 1(95). С. 88–96.
- Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. (РД 52.27.759) М., Гидрометцентр России, 2011. 66 с.
- Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Gleason B.E., Vose R.S., Rutledge G., Bessemoulin P., Bronnimann S., Brunet M., Crouthamel R.I., Grant A.N., Groisman P.Y., Jones P.D., Kruk M., Kruger A.C., Marshall G.J., Maugeri M., Mok H.Y., Nordli Ø., Ross T.F., Trigo R.M., Wang X., Woodruff S.D., Worley S.J. The Twentieth Century Reanalysis Project // Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 1–28.
- Ivanov N.E., Demchev D.M., Nesterov A.V. Application of A.M. Obukhov's theory of correlation of vectors for scientific research and engineering calculations of ice drift in the Arctic Ocean // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V. 1040. 012024. 2020. P. 1–12. doi:10.1088/1755-1315/1040/1/012024
- Jonassen M.O., Valisuo I., Vihma T., Uotila P., Makshatas A.P., Launiainen J. Assessment of atmospheric reanalyses with independent observations in the Weddell Sea, the Antarctic // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. V. 124. 2019. P. 12468–12484. doi: 10.1029/2019JD030897.
- King J., Marshall G., Colwell S., Arndt S., Allen-Sader C., Phillips T. The performance of the ERA-Interim and ERA5 atmospheric reanalyses over Weddell Sea pack ice // Journal of Geophysical Research: Oceans. V. 127. 2022. P. 1–12. doi:10.1029/2022JC018805.
- Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P., Davy R. Multi-model ensemble mean of global climate models fails to reproduce early twentieth century Arctic warming. // Polar Science. 2021. V. 30. 100677. doi.org/10.1016/j.polar.2021.100677.
- May R.I. Verification of sea ice drift data obtained from remote sensing information // Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2018. P. 7344–7347, doi: 10.1109/IGARSS.2018.8517650.
- Poli P., Hersbach H., Dee D.P., Berrisford P., Simmons A.J., Vitart F., Laloyaux P., Tan D.G.H., Peubey C., Thepaut J., Tremolet Y., Holm E.V., Bonavita M., Isaksen I., Fisher M. ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century // Journal of Climate. V. 29(11). 2016. P. 4083–4097.
- Tsedrik S.V. Model of the schooner «Saint Anna» drift with the usage of NOAA-CIRES-DOE 20CR and ERA-20C reanalyses. // Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023). Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47851-2_20

**COMPARISON OF ATMOSPHERIC REANALYSIS
OF THE XX CENTURY WITH THE METEOROLOGICAL OBSERVATIONS
OF THE EXPEDITION OF G.L. BRUSILOV ON THE SHIP «ST. ANNA»
DURING THE FORCED DRIFT OF 1912–1914**

R. I. May^{1, 2, *}, S. V. Tsedrik², E. O. Ermolov³

¹*Krylov State Research Center, Moskovskoe shosse, 44, St. Petersburg, 196158, Russia*

²*St. Petersburg State University, 10 line V.O., 33–35, St. Petersburg, 199178, Russia*

³*FSBI «Russian Arctic National Park», emb. Northern Dviny, 36, Arkhangelsk, 163069, Russia*

**e-mail: rimay@mail.ru*

The paper presents the results of a comparison of the atmospheric reanalysis of the 20th century ERA-20C and NOAA-CIRES-DOE 20th Century Reanalysis with the data of meteorological observations made during the forced drift of the schooner «St. Anna» in 1912–1914 in the Arctic. Synchronous time series of atmospheric pressure, air temperature and wind were compared using correlation analysis and estimates of mean error (bias) and root-mean-square error (RMSE). To compare wind data, specialized techniques for comparing vector series were used. For all meteorological characteristics, the NOAA-CIRES-DOE 20 version 3 reanalysis shows the highest values of correlation and the lowest RMSE values. The minimum mean error values for atmospheric pressure and air temperature data are shown by the ERA-20C reanalysis. It has been established that there is a systematic deviation of approximately 12–15° between the wind measurement data and the reanalysis wind.

Keywords: twentieth century reanalyses, verification, «Saint Anna», vector correlation, root-mean-square error