

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.466.31(262.81)

ДАННЫЕ РЕАНАЛИЗА ПОЛЕЙ ВЕТРА НАД КАСПИЙСКИМ МОРЕМ ДЛЯ РАСЧЕТА РЕЖИМА ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ¹

© 2019 г. Л. И. Лопатухин^{1,2,*}, Н. А. Яицкая^{3,4,**}

¹Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199178 Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики
Санкт-Петербург, 197101 Россия

³Южный научный центр РАН
Ростов-на-Дону, 344006 Россия

⁴Сочинский научно-исследовательский центр РАН
Сочи, 354000 Россия

*e-mail: leonid-lop@yandex.ru; **e-mail: yaitskayan@gmail.com

Поступила в редакцию 21.01.2017 г.

После доработки 30.09.2018 г.

Принята к публикации 18.10.2018 г.

Для расчета режима волнения в соответствии с рекомендациями Всемирной метеорологической организации необходима база данных, охватывающая не менее 30 лет. Непрерывные измерения волнения за такой промежуток времени отсутствуют или имеются только для ограниченного числа прибрежных акваторий. Обычно эта информация — результат расчетов по численным (спектральным) гидродинамическим моделям ветрового волнения. Входные данные при этом — сведения о ветре из реанализов. Не для всех морских акваторий реанализ может быть использован для расчетов волнения без предварительной обработки. На примере Каспийского моря показан подход к корректровке данных реанализа NCEP/NCAR. Приведены результаты процедуры.

Ключевые слова: Каспийское море, поля ветра, реанализ, ветер на метеорологических станциях, регрессия.

DOI: 10.31857/S0321-0596466598-604

ВВЕДЕНИЕ

Для развития мореплавания и освоения ресурсов Мирового океана требуется детальная информация о волнении моря. Концепция обеспечения волновой информацией базируется на трех основных принципах:

1) получение базы данных путем расчетов волнения по численным спектральным моделям;

2) расчет статистических характеристик динамики моря (включая ветер и волнение) по вероятностным моделям с использованием вышеупомянутой базы данных;

3) применение высокопроизводительных компьютерных технологий, позволяющих создавать и обрабатывать массивы данных (поля ветра

и волнения) за десятки лет практически с любой пространственно-временной дискретностью.

Указанный подход получил наибольшее распространение во всем мире, в том числе в России, при решении многочисленных научных и прикладных задач [7]. Подтверждение применимости указанного подхода — публикация Российским морским регистром судоходства справочников нового поколения по режиму ветра и волнения на морях [3].

Гидродинамические модели волнения основаны на решении уравнения баланса волновой энергии в спектральной форме, поэтому их называют спектральными, а волновой климат на основе результатов такого моделирования — “спектральным волновым климатом”.

Общая схема расчета волнового климата включает в себя следующие основные этапы:

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 16-35-60046 мол_а_дк) и РФФИ-РГО (научный проект 17-05-41190 РГО_а).

1) подготовка входной информации (батиметрия, ледовые условия, поля ветра и т.д.) для расчетов волнения;

2) расчет (“hindcasting”) спектров волнения и видимых элементов волн в узлах регулярной пространственно-временной сетки по гидродинамическим моделям;

3) статистическое обобщение результатов расчетов волнения посредством вероятностных (стохастических) моделей.

Каждый этап может быть подразделен на различное количество ступеней.

В настоящее время информационная база для расчета полей ветра по гидродинамическим моделям — данные из массивов реанализов. Реанализ выполнен практически для всех ме-

теорологических величин, параметры которых приведены в узлах регулярной сетки, покрывающей Земной шар с различной дискретностью и временным шагом 6 ч и реже. В настоящее время наиболее известен проект реанализа NCEP/NCAR, созданного в США для всего Земного шара, а также аналогичные проекты ERA-15, ERA-40, ERA-INTERIM, реализованные Европейским центром среднесрочных метеопрогнозов (ECMWF). Для некоторых районов есть региональные разработки с большей пространственной детализацией. Информацию о составе данных реанализов, пространственно-временной дискретности можно найти в [12]. Краткое резюме по данным реанализа из различных источников приведено в табл. 1.

Таблица 1. Данные реанализа, используемые для моделирования параметров основных гидрометеорологических характеристик (н.в. — настоящее время)

Название массива (ссылка)	Покрытие	Годы	Разрешение	Параметры
NCEP/NCAR Reanalysis 1	Земной шар	1948 — н.в.	Гауссовская сетка 192×94 точек, шаг по времени — 6 ч	Давление, меридиональная и зональная компоненты ветра, температура поверхности моря, температура воздуха, сумма осадков, потоки тепла, тип облачности, концентрация льда (площадь моря, покрытая льдом, и др.)
ERA Interim Reanalysis	Земной шар	1979 — н.в.	Гауссовская сетка 256×512, шаг по времени — 6 ч	Давление, меридиональная и зональная компоненты ветра, температура (поверхности моря, воздуха, льда, снега), суммарные осадки, потоки тепла, тип облачности; концентрация льда, осредненные параметры ветрового волнения (период, направление, значительная высота волн)
NOAA WAVEWATCH III® CFSR Reanalysis Hindcasts	Земной шар	1979–2007	Регулярная сетка 0.5°	Параметры морского волнения, полученные по модели WAVEWATCH III
ERA 40	Земной шар	Сентябрь 1957–август 2002	Гауссовская сетка 320×160, шаг по времени — 6 ч	Давление, меридиональная и зональная компоненты ветра, температура (поверхности моря, воздуха, льда, снега), суммарные осадки, потоки тепла, тип облачности, концентрация льда, осредненные параметры волнения (период, направление, значительная высота волн)

В настоящей работе для анализа и последующей корректировки данных выбран реанализ NCEP/NCAR [9] из-за наибольшего охвата времени, что позволит в будущем с привлечением гидродинамических моделей восстановить более чем полувековой режим волнения в Каспийском море.

ВЕТЕР ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА И ИЗМЕРЕНИЯМ НА МЕТЕОСТАНЦИЯХ

В реанализе исходная информация о ветре представлена в виде наборов меридиональной (U) и зональной (V) компонент на высоте 10 м над уровнем моря. Основной недостаток полей ветра реанализа над морем — зависимость их качества от обеспеченности расчетного района наблюдениями. На рис. 1 приведены результаты сопоставления рядов модуля скорости ветра в Каспийском море по измерениям на прибрежных гидрометеостанциях (ГМС) и реанализу NCEP/NCAR. На рис. 1а видно, что пространственно-временная неоднородность полей ветра над сравнительно небольшой акваторией Север-

ного Каспия неоднозначно воспроизводится глобальными моделями. Кроме того, данные реанализа могут отклоняться от данных измерений на ГМС в сторону как больших (рис. 1б), так и меньших значений.

При систематическом отличии данных реанализа от данных наблюдений и высокой статистической связи между ними их можно “откорректировать” с помощью регрессионной модели. Этот подход уточнения данных по ветру по измерениям на ГМС описан в [1, 2, 10]. Аналогичная процедура предложена в настоящей работе. В качестве источников данных измерений ветра использована информация из [4, 8].

Проверка качества данных ГМС Каспийского моря проводилась с отбрасыванием завышенных скоростей ветра. В результате были отобраны семь репрезентативных станций (“Махачкала”, “Форт-Шевченко”, “Туркменбаши”, “Лагань”, “Атырау”, “о. Песчаный”, “о. Тюлений”), которые расположены в непосредственной близости от узлов сетки реанализа и дают согласованную картину поля ветра без существенных выбросов и артефактов.

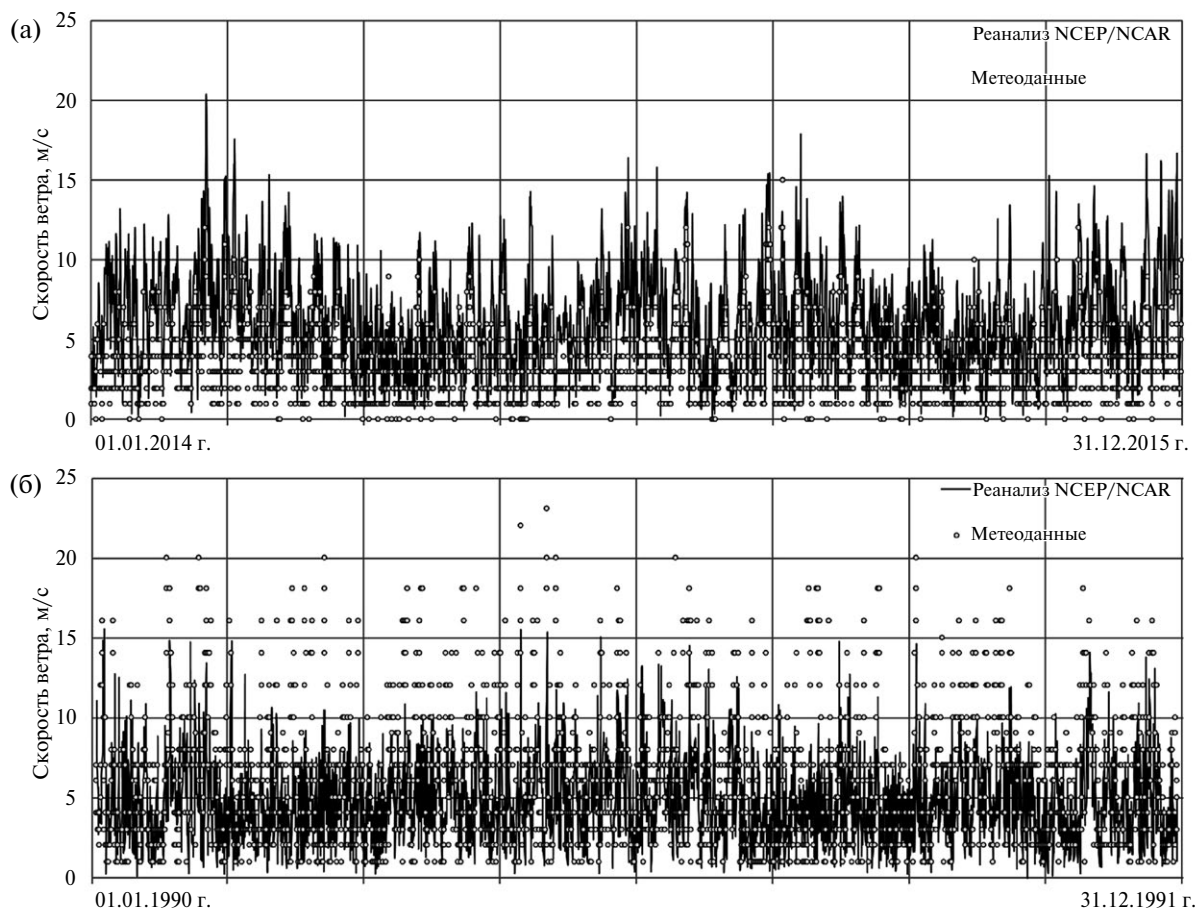


Рис. 1. Срочные значения (через каждые 6 ч) модуля скорости ветра по данным ГМС “Атырау” (а) и “о. Песчаный” (б) и реанализа NCEP/NCAR.

КОРРЕКТИРОВКА ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА

Попарное сопоставление метеоданных и реанализа на отдельных ГМС показало, что для Каспийского моря не наблюдается систематических различий между данными реанализа и измерений на прибрежных ГМС. Поэтому при детальном анализе волновых условий на акватории моря (в отличие от поправок, предложенных, например, в [5, 6, 11]) применение одного уравнения для корректировки данных по всей акватории приведет к грубому осреднению пространственно-временной изменчивости полей ветра над всей акваторией [6]. В связи с этим море было разделено на отдельные районы, для которых вычислялись коэффициенты регрессионной модели с последующим исправлением данных реанализа.

На основе сопоставления данных реанализа NCEP/NCAR с измерениями на выбранных ГМС построен ряд регрессионных зависимостей для корректировки расчетных полей ветра, представленных на рис. 2. Для данных всех ГМС характерны нелинейная зависимость и высокая корреляция с данными реанализа (коэффициент детерминации ≥ 0.9). Параметры регрессии приведены в табл. 2. Данные рис. 2 и табл. 2 показывают, что разница скорости ветра меняется с С к Ю. Сезонные регрессии (зима – ноябрь–март, лето – апрель–октябрь) близки между собой как по знаку, так и по величине. Это позволяет утверждать, что при “корректировке” реанализа для Каспийского региона главное внимание необходимо уделять скорости ветра. Акваторию Каспийского моря можно разделить на ряд районов по типам регрессии в зависимости от разнообразия ветровых условий и, соот-

ветственно, преобладающего типа атмосферной циркуляции. В частности, вдоль западного побережья Каспия реанализ дает заниженные скорости ветра над морем. Особенно наглядно это проявляется в данных ГМС “о. Тюлений”. Подобная тенденция сохраняется и в центральной части моря (ГМС “о. Песчаный”). Крайняя северо-восточная часть акватории (ГМС “Атырау”) имеет свою специфику временных изменений скоростей ветра. Для западного побережья Каспийского моря, в частности его центральной части в районе п-ова Мангышлак (ГМС “Форт-Шевченко”), данные реанализа незначительно занижают большие (на 9–10%) и завышают малые (< 10 м/с) скорости ветра.

Интерес вызывают данные по штормовым ситуациям ГМС “Туркменбаши” (в прошлом “Красноводск”) и “Песчаный”. Графики на рис. 3 и 4 показывают, что для скорости ветра > 15 м/с данные реанализа существенно занижают оценки скорости ветра.

Таким образом, в корректировке данных по ветру реанализа NCEP/NCAR используются регрессионные соотношения с коэффициентами, приведенными в табл. 2. В частности, для акватории моря от западного побережья до центральной части моря предлагается последовательно, продвигаясь с С на Ю, использовать регрессионные коэффициенты для ГМС: “о. Тюлений”, “Махачкала”, “о. Песчаный”; для восточного побережья – соответственно “Атыртау”, “Форт-Шевченко”, “Туркменбаши”, “Решт”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные реанализа полей атмосферного давления и ветра дали возможность расчета волнового

Таблица 2. Параметры нелинейной регрессии: $y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$ между данными реанализа и измерениями на ГМС (y – скорость ветра по данным реанализа, x – оценки скорости ветра)

ГМС	Долгота	Широта	Параметры уравнений регрессии											
			Год				Зима				Лето			
			a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
Атырау	51.85	47.12	-0.00060	0.02228	-0.33190	3.14630	-0.00080	0.02670	-0.36550	3.36070	-0.00170	0.04700	-0.48600	3.30820
Махачкала	47.50	42.97	-0.00170	0.05490	-0.61910	3.57170	-0.00390	0.10280	-0.92600	4.10280	-0.00200	0.06390	-0.70850	3.86610
Песчаный	50.00	40.30	-0.00080	0.00130	-0.07580	1.30540	-0.00040	0.01360	-0.16920	1.52500	0.00020	-0.00160	-0.06040	1.27410
Решт	49.60	37.32	-0.00230	0.07390	-0.88340	5.43230	-0.00230	0.07490	-0.89640	5.48130	Нет данных			
Туркменбаши	53.00	40.05	-0.00210	0.06480	-0.68450	3.87450	-0.00220	0.06130	-0.61040	3.59480	-0.00180	0.05400	-0.57650	3.53400
Тюлений	47.50	44.50	-0.00060	0.02530	-0.31990	2.13470	-0.00090	0.03570	-0.42370	2.50840	-0.00070	0.02780	-0.32240	2.01890
Форт-Шевченко	50.24	44.55	-0.00050	0.01900	-0.28410	2.47610	-0.00070	0.02770	-0.37110	2.78040	-0.00080	0.03280	-0.43830	2.95360

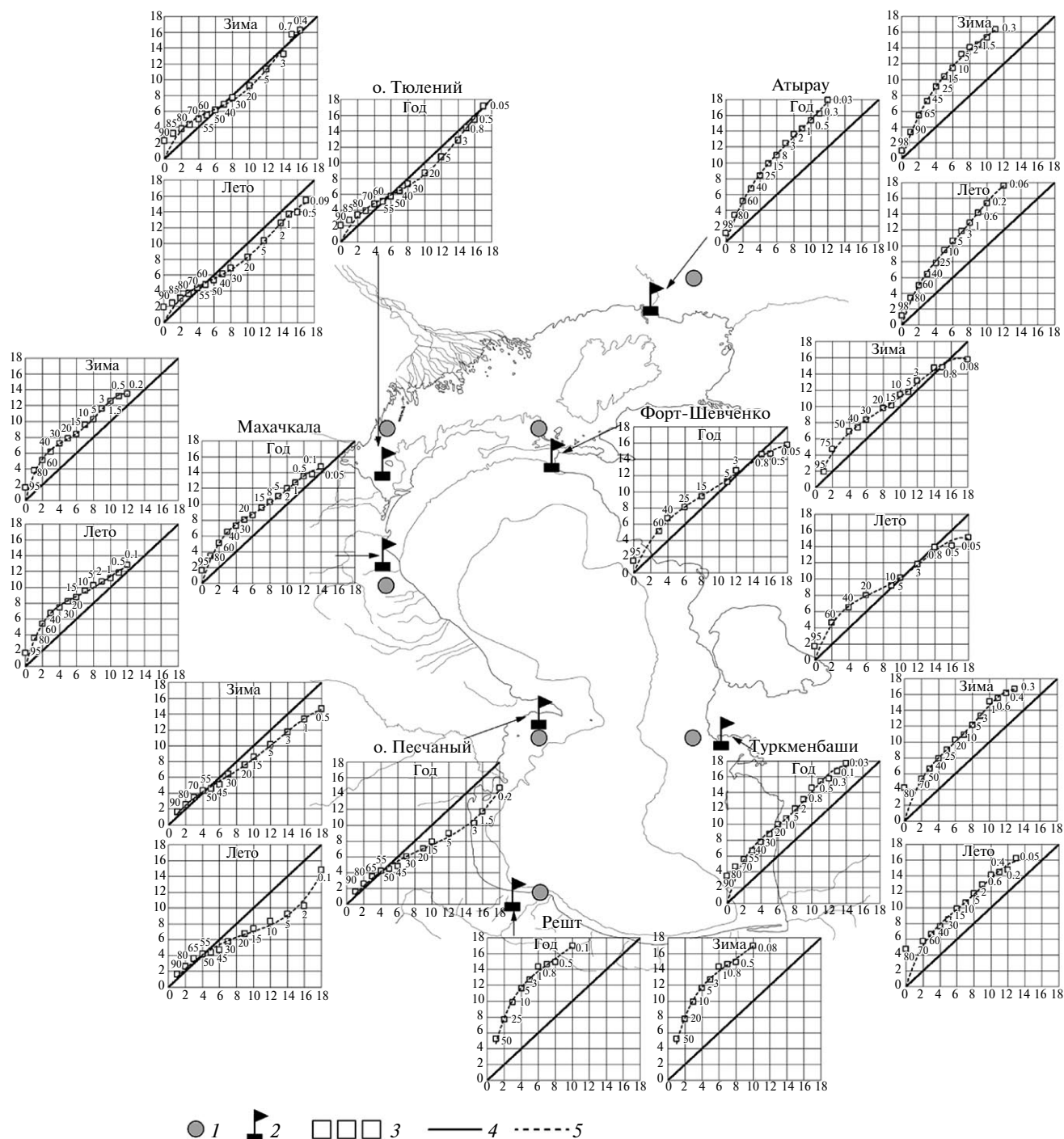


Рис. 2. Квантильные биplotы срочных значений модуля скорости ветра (V , м/с) по данным реанализа NCEP/NCAR в узлах сетки (1) и измерениям на ГМС (2) в целом за год и за два сезона: 3 — квантили, 4 — биссектриса координатного узла, 5 — линия регрессии (калибровочная кривая). Ось абсцисс — данные наблюдений, ось ординат — реанализ. Цифры на графике соответствуют обеспеченности (%) квантилей. Зима — ноябрь–март; лето: апрель–октябрь.

климата по статистическому ансамблю полей ветра за несколько десятилетий. Достоверность данных реанализа ветра не одинакова не только для разных акваторий, как показали исследования [2, 11], но и в пределах одного моря. Это продемонстрировано на примере Каспийского моря. Для скорости ветра <math>< 15\text{ м/с}</math> реанализ в целом завышает значения по сравнению с из-

мерениями на прибрежных ГМС, а для скорости $\geq 15\text{ м/с}</math> занижает. Поэтому для восстановления с помощью математического моделирования полной картины ветрового волнения, в том числе и штормовых ситуаций, необходимо применять последовательную процедуру коррекции данных — отдельно для каждого региона моря и для штормовых ситуаций.$

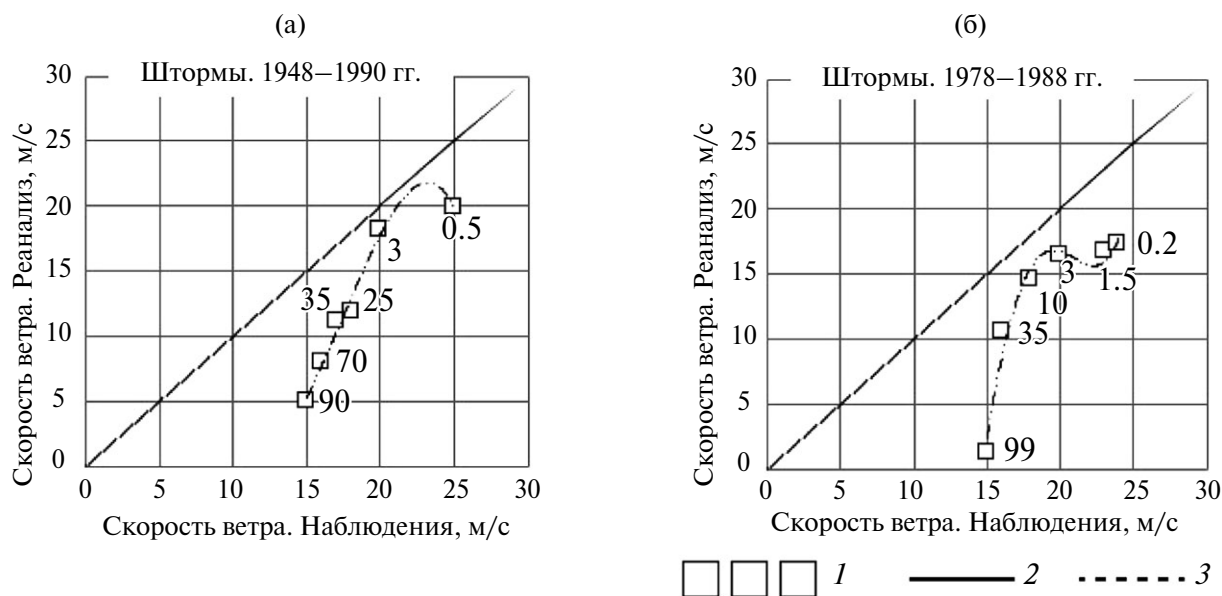


Рис. 3. Квантильные биплоты срочных значений модуля скорости ветра ($V > 15$ м/с) по данным реанализа NCEP/NCAR в узлах сетки и измерениям на ГМС “Туркменбаши” (а) и “Песчаный” (б): 1 — квантили, 2 — биссектриса координатного узла, 3 — линия регрессии (калибровочная кривая). Цифры на графике соответствуют обеспеченности (%) квантилей.

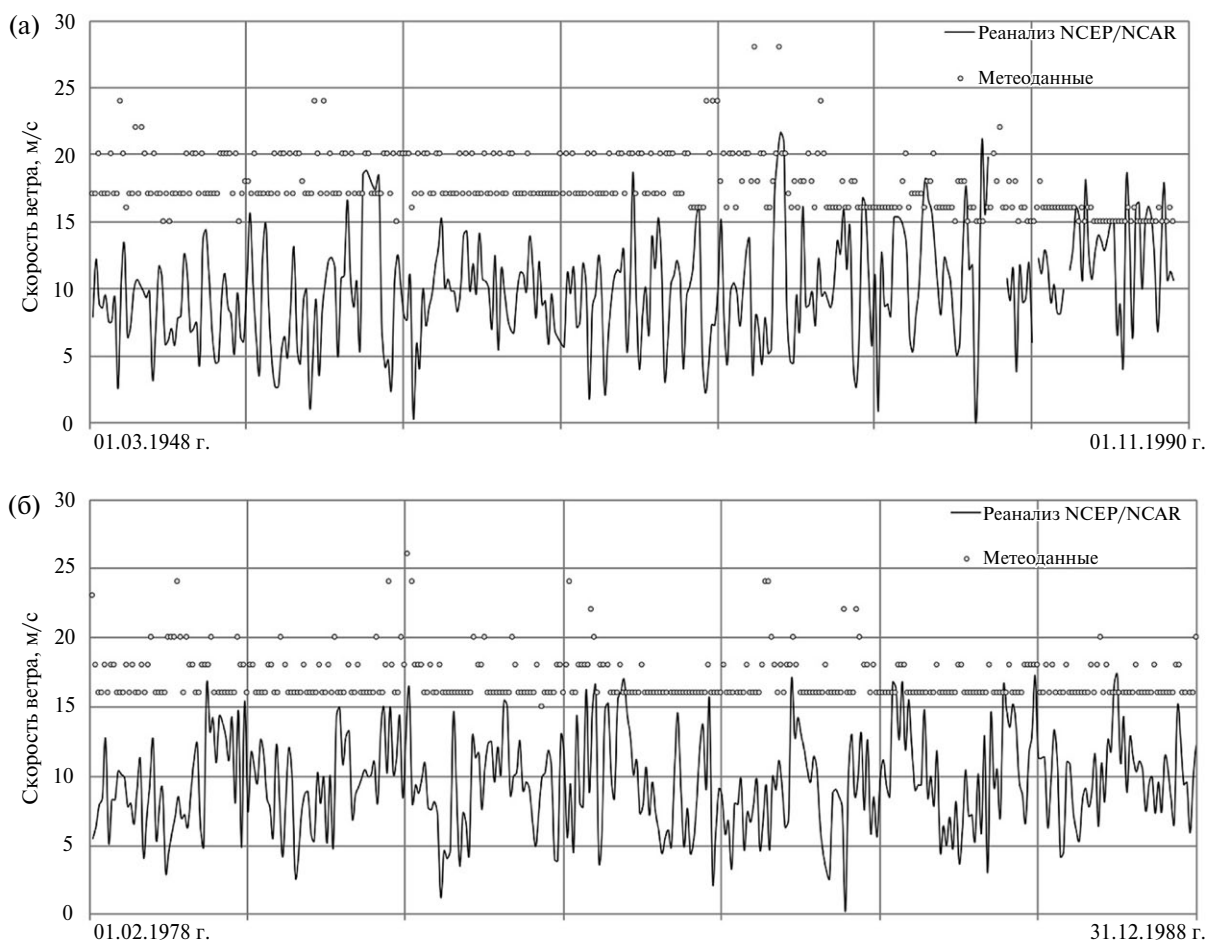


Рис. 4. Сопоставление скорости ветра ($V > 15$ м/с) по данным реанализа NCEP/NCAR и метеонаблюдений на ГМС “Туркменбаши” (а) и “Песчаный” (б) для штормовых ситуаций с 1948 по 1990 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухановский А.В., Иванов С.В., Лопатухин Л.И. Подходы, опыт и некоторые результаты исследований волнового климата океанов и морей // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология. География. 2005. № 3. С. 62–74.
2. Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Чернышева Е.С. Новое поколение справочников по режиму волнения морей // Науч.-техн. сб. Рос. морского регистра судоходства. 2011. Вып. 34. С. 50–65.
3. Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Чернышева Е.С., Колесов А.М. Шторм на Черном море 11 ноября 2007 и статистики экстремальных штормов моря // Изв. РГО. 2009. Вып. 2. С. 71–84.
4. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. <http://portal.esimo.ru/portal> (Дата обращения 26.06.2019).
5. Лопатухин Л.И. Ветровое волнение. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. 165 с.
6. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Зильберштейн О.И., Лобов А.Л., Чумаков М.М., Попов С.К. Инженерно-гидрометеорологические изыскания на трассе североευропейского газопровода // Тр. 7-й Междунар. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа СНГ RAO/CIS Offshore. СПб., 2005. С. 333–337.
7. Мирзоев Д.А., Зильберштейн О.И., Лопатухин Л.И., Миронов Е.У., Михайлов Н.Н. Концепция обеспечения специализированной гидрометеорологической информацией проектирования сооружений на шельфе арктических морей // Тр. Четвертой Междунар. конф. “Освоение шельфа арктических морей. RAO-99”. СПб., 1999. Ч. 1. С. 311–318.
8. Расписание погоды. RP5. https://rp5.ru/Погода_в_мире (Дата обращения 26.06.2019).
9. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 437–470.
10. Lin L., Resio D. Improving wind input information for Great Lakes wave hindcast study // Proc. 6th Int. Workshop on wave Hindcasting and Forecasting. 2000. P. 29–43.
11. Lopatoukhin L.J., Boukhanovsky A.V., Chernysheva E.S., Ivanov S.V. Hindcasting of wind and wave climate of seas around Russia // Proc. 8th Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. 2004.
12. Research Data Achieve. Computational and Information Systems Lab. NCAR UCAR. <http://rda.ucar.edu/> (Дата обращения 26.06.2019).

REANALYSIS DATA OF WIND FIELDS ABOVE THE CASPIAN SEA FOR CALCULATION OF WIND-INDUCED WAVES

© 2019 L. I. Lopatoukhin^{1,2,*}, N. A. Yaitskaya^{3,4}

¹*Saint-Petersburg State University. Oceanography Department
Russia 199178 Saint-Petersburg*

²*Saint-Petersburg State University of information technologies, mechanics and optics
Russia 197101 Saint-Petersburg*

³*Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences
Russia 344006 Rostov-on-Don*

⁴*Sochi Research Centre of the Russian Academy of Sciences
Russia 354000 Sochi*

Received: 21.01.2017

Revised version received: 30.09.2018

Accepted: 18.10.2018

e-mail: *leonid-lop@yandex.ru; ** yaitskayan@gmail.com

A database covering at least 30 years is required for calculation of the wind-induced waves mode in accordance with recommendations of the World Meteorological Organization. Continuous measurements of wind-induced waves for this period of time are missing or available only for a limited number of offshore strips. Typically this information is a result of calculations based on numerical (spectral) hydrodynamic models of the wind-induced waves while input data is information regarding wind from reanalyses. Reanalysis can be used for calculation of wind-induced waves without any preliminary processing but not for all offshore zones. The Caspian Sea is used as an example to demonstrate an approach to revision of the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research reanalysis data and study results are provided.

Keywords: Caspian Sea, wind fields, reanalysis, wind, weather stations, regression

DOI: 10.31857/S0321-0596466598-604