© Лопатухин Л.И., 2019, Океанологические исследования, 2019, Том 47, № 5, С. 89–97

УДК 551 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).7

ВЕТРО-ВОЛНОВОЙ КЛИМАТ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Лопатухин Л.И.

Санкт-Петербургский Государственный университет.
Кафедра Океанологии. Санкт-Петербург. 199178, Россия.
e-mail: leonid-lop@yandex.ru; l.lopatuhin@spbu.ru
Статья поступила в редакцию 09.01.2019, одобрена к печати 13.12.2019

Представлены концепция и подходы к оценке волнового климата. Входной информацией для расчётов волнения по численным моделям являются данные реанализа. При расчетах волнения, особенно его экстремальных характеристик и оценки структуры полей ветра в наиболее сильных штормах, данные реанализа необходимо корректировать, в частности с помощью регрессионной модели. Для расчёта волнения Каспийского моря использована нелинейная нестационарная численная гидродинамическая модель SWAN. Расчёты выполнялись для временного интервала 40 лет в два этапа. Вначале рассчитывался ветер и волнение по всему морю, затем, с учётом этих расчётов выполнялись детальные вычисления для мелководных районов северного Каспия. Приведены оценки экстремальных высот волн для районов с различными глубинами.

Ключевые слова: волнение, волновой климат, ветер, реанализ, корректировка данных, экстремальные высоты волн

Введение

По физико-географическим и морфологическим особенностям Каспийское море подразделяют на три больших района: северный, средний и южный. Точную границу Северного Каспия, отделяющую его от Среднего, проводят по-разному; в фундаментальных справочниках по режиму ветра и волнения, изданных Российским морским Регистром судоходства (Давидан, Лопатухин, Рожков, 1974; Лопатухин и др., 2003), и картах волнения, опубликованных Министерством Обороны СССР (Лопатухин, 1988), граница между Северным и Средним Каспием проходит по 45°с.ш. Северный Каспий в упомянутых изданиях представлен *одним* большим районом.

Условия волнообразования любой акватории связаны с прохождением барических образований (синоптическая изменчивость), годовой ритмикой (сезонная изменчивость) и долгопериодными вариациями циркуляционных процессов (межгодовая изменчивость). Смысл различных определений режима волнения (волнового климата) заключается в указании вероятности параметров волнения на заданной акватории. Сложившаяся практика проектирования и эксплуатации судов и средств океанотехники подразделяет режимные характеристики ветра и волн на экстремальные и оперативные. Первые определяют так называемый режим выживания сооружения или судна, а вторые – режим их повседневной эксплуатации.

В течение длительного времени (до 70-х гг. XX века) основным источником информации о режиме волнения, особенно для открытых и удаленных от суши акваторий, являлись визуальные наблюдения, выполняемые штурманским составом различных судов. Интенсивное развитие мореплавания и освоение ресурсов Мирового океана повысили требования к составу режимной информации о волнении. Международным научным сообществом, включая российских исследователей, была разработана концепция обеспечения гидрометеорологической информацией, необходимой для освоения ресурсов океанов и морей (Мирзоев и др., 2009). Концепция получила широкое распространение во всем Мире (в том числе в России), была признана, одобрена и реализована при решении многочисленных научных и прикладных задач. В результате общая схема расчёта волнового климата состоит из следующих основных этапов:

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

• расчёта (hindcasting) по гидродинамической модели спектров волнения и видимых элементов волн в узлах пространственной сетки;

• статистического обобщения результатов расчётов посредством вероятностных моделей.

Реализация этой концепции стала возможной благодаря следующим обстоятельствам, коренным образом изменившим подход к расчёту режима динамики моря (включая волнение, течения, уровень моря);

– появлению численных моделей, позволяющих рассчитывать основные параметры волнения, течений и уровня моря;

– созданию массивов входных данных для реализации в численных моделях (в результате выполнения международных проектов по реанализу метеорологических данных).

– прогрессу в развитии вычислительной техники, позволившему создавать расчётные поля волнения заданной дискретности за десятки лет.

Статистическая обработка информационной базы гидрометеорологических характеристик, полученных в результате расчётов по гидродинамическим моделям, выполняется средствами многомерного статистического анализа (МСА) пространственно-временных полей. В результате, могут быть также построены карты ветра и волнения различной обеспеченности (вероятности) и заданным периодом повторяемости (например, 1 раз в 100 лет). На рис. 1 представлена принципиальная схема описания волнового климата на основе традиционных источников данных и в рамках рассмотренной выше концепции. Представление об экстремальном волнении можно получить из рис. 2.

Каспийское море обладает рядом особенностей, осложняющих оценку волнового климата. Кроме известных по многочисленным публикациям долгопериодных (включая вековые) изменений уровня, на Каспии наблюдаются сравнительно короткопериодные колебания, возбуждаемые устойчивыми штормовыми ветрами.

Рис. 1. Принципиальная схема описания волнового климата.

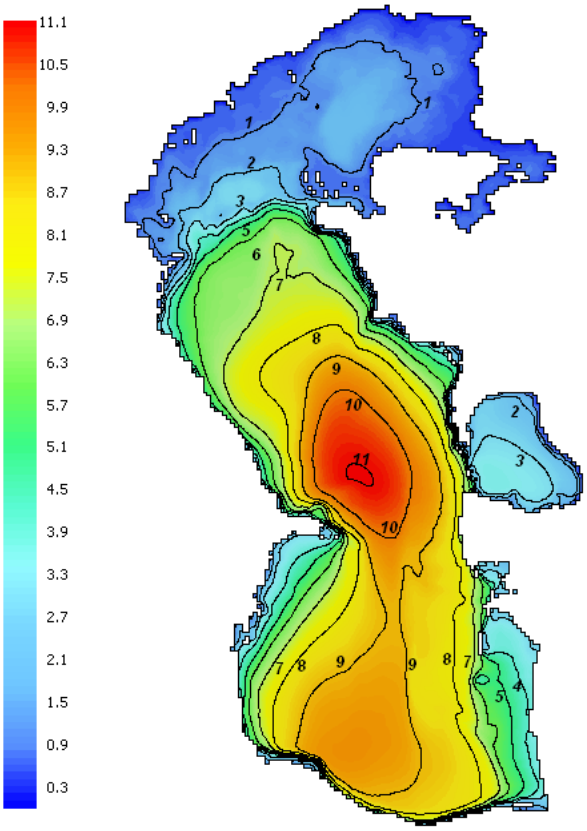

Рис. 2. Оценки значительных высот волн, возможных 1 раз в 100 лет.

Обширные мелководья и малые уклоны дна Северного Каспия приводят к тому, что сгонно-нагонные колебания уровня могут достигать нескольких метров. В частности, при нагонах уровень может повыситься на 2.5–3.0 м, а при сгонах – понизиться на 1.0–2.5 м. Наиболее часто нагоны продолжаются 1.5–2.5 суток, а их максимальная продолжительность достигает 6–8 сут. Средняя продолжительность сгонов составляет 2–3 сут, а наибольшая – достигает 8–10 сут. Из-за мелководности акватории величина сгонов и нагонов сопоставима с абсолютной глубиной моря, что сказывается на оценках параметров волн. По этой причине при расчёте волнения необходимо учитывать изменение уровня моря. Для мелководного Северного Каспия необходимо создание массивов переменных глубин с учётом короткопериодных изменений уровня при конкретных синоптических ситуациях (с использованием гидродинамических моделей) и долгопериодных вариаций уровня моря. Такая информация должна охватывать временной период не менее 30 лет с дискретностью синоптических сроков. Затем рассчитывается ветер и волнение на грубой сетке для

моря в целом и на детальной сетке для Северного Каспия. Результаты численных гидродинамических расчётов обобщаются средствами МСА. В результате, для множества расчётных точек, включая известные месторождения углеводородов, может быть получен широкий набор оперативных и экстремальных статистик волнения. В частности климатических спектров, высот волн, их периодов, длин и т.п.

Данные по ветру, использованные при расчётах волнения Каспийского моря

Входными данными для расчёта ветрового волнения являются поля ветра, полученные по результатам реанализа. Под реанализом понимается воспроизведение массивов гидрометеорологических полей на регулярной сетке путем усвоения данных наблюдений в расчётах, выполненных по диагностической модели. В качестве исходных материалов для подготовки информационной базы полей ветра Каспийского моря использовался фрагмент массива данных реанализа NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Centers for Atmospheric Research). Эта база данных содержит метеорологические поля с 1948 г. по настоящее время. Изначально реанализ предназначался для оценки крупномасштабных климатических изменений. Поэтому данные реанализа могут занижать экстремальные характеристики в сильных штормах. Следовательно, необходимо уточнение (калибровка) метеорологических полей над морем, с использованием данных измерений из различных независимых источников (судовые наблюдения, данные метеостанций, спутниковые данные). Смысл калибровки состоит в том, что при расчёте скорости приводного ветра по полям давления используется зависимость $V = kV_g$, где k– коэффициент перехода (регрессии), зависящий от характеристик стратификации атмосферы в слое непосредственно над подстилающей поверхностью, а V_g – скорость градиентного ветра. Методика калибровки, в том числе применительно к Каспийскому морю, описана достаточно подробно (Бухановский и др., 2005; Бухановский и др., 2017; Лопатухин, Яицкая, 2018).

Гидродинамические модели, используемые при расчётах волнового климата

Для описания зависимости ветрового волнения от условий волнообразования используется уравнение баланса волновой энергии, которое связывает между собой явления поступления энергии от ветра, её адвекции из других районов, диссипации и перераспределения за счёт нелинейного взаимодействия между частотными составляющими процесса волнения. Поскольку модели основаны на решении уравнения баланса в спектральной форме, их называют спектральными, а волновой климат на основе результатов такого моделирования – «спектральным волновым климатом». Модели успешно применяются для диагноза и прогноза волнения в различных районах океанов, в том числе с оперативным усвоением данных наблюдений. Наиболее часто ис-

пользуются три модели, разработанные международными коллективами ученых: Wave Watch (WW), Wave Model (WAM), а также Simulating Waves Near Shore (SWAN). Модели находятся в свободном доступе и открыты для широкого круга пользователей. Обзоры гидродинамических моделей, используемых при расчётах волнения в морях и океанах, приводится в многочисленных публикациях (Лопатухин и др., 2003; Лопатухин, 2012). Переход от спектров волнения к видимым элементам волн (высотам, периодам и т.п.) осуществляется по соотношениям через спектральные моменты. Для расчета параметров волнения Каспийского моря нами использована модель SWAN в версии 40.85. Расчёты для Каспийского моря выполнялись для 40 лет в два этапа. На сетке 126×216 = 27216 ячеек с пространственным шагом 3 морские мили и шагом по времени 15 мин рассчитывались ветер и волнение по всему морю. Затем на основе результатов этих расчётов выполнялся детальный расчёт волнения для районов северного Каспия.

Комбинированные распределения высот волн на акватории ограниченной глубины

В работах (Боков и др., 1995; Лопатухин, 2012) показано, что распределение высот волн на глубокой воде задается комбинированным распределением вида:

$$F(h) = \int_0^\infty G(h,\overline{h}) f(\overline{h}) d\overline{h}, \qquad (1)$$

где $f(\overline{h})$ – плотность режимного распределения высот волн (средних или другой обеспеченности) в синоптические сроки. $G(h,\overline{h})$ – распределение высот индивидуальных волн на промежутке квазистационарности.

Для высот волн на акватории ограниченной глубины H верхний предел в формуле (1) должен быть конечным и зависеть от предельной высоты волны $h_{\lim}$, соответствующей её обрушению.

На рис. 3 приведены диаграммы рассеяния между средними высотами волн в относительно глубоководной точке (27 м) и точками с меньшими глубинами.

Данные рисунка 3 наглядно показывают уменьшение высот волн в зависимости от глубины места.

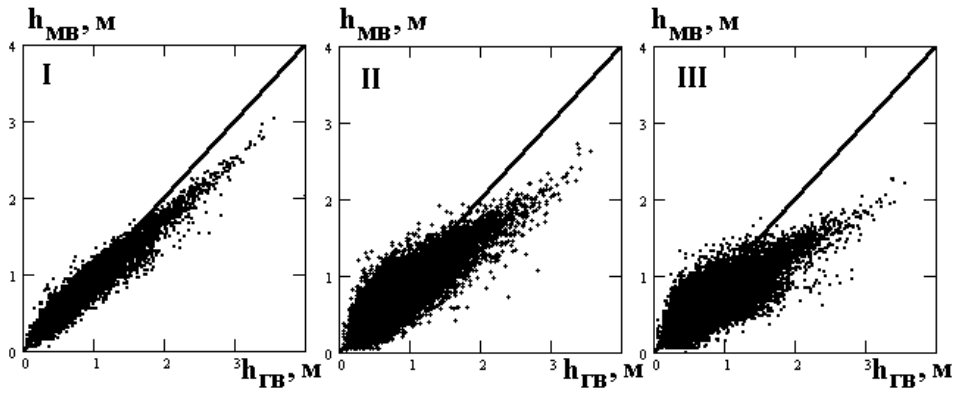

Рис. 3. Диаграммы рассеивания (точечные диаграммы) высот волн на глубокой $h_{гв}$ (H = 27 м) и мелкой $h_{мв}$ воде с глубинами: I – 15 м, II – 12 м, III – 6 м. Северный Каспий.

Крайние члены выборок высот индивидуальных волн на промежутке квазистационарности, распределенных по (1), и высот волн фиксированной квантили в синоптические сроки (распределенных, например, по закону Вейбулла или логнормальному), при отсутствии параметра усечения за счёт глубины места асимптотически распределены по закону Гумбеля с параметрами A_1 и B_1:

$$F(h) = \exp\left[-\exp\left[-\frac{h - A_1}{B_1}\right]\right] \tag{2}$$

Для учета влиянии мелководья в распределение (2) должен быть введен третий параметр C (Lopatoukhin et al., 2000):

$$F(h) = \begin{cases} \exp\left[-\exp\left[-\frac{h - A_1}{B_1}\right] + C\right], & h \le h_{\lim} \\ 1, \quad h > h_{\lim} \end{cases} \tag{3}$$

Параметр C связан с предельной высотой волны $h_{\lim}$ соотношением:

$$C = \exp\left[-\frac{h_{\lim} - A_1}{B_1}\right]. \tag{4}$$

В общем случае точное значение высоты обрушения $h_{\lim}$ для конкретных условий волнообразования определить затруднительно (считается, что на мелководье предельная высота волны может в среднем составлять 0.7–0.8 от глубины места). Для оценки $h_{\lim}$ допустимо использовать выражение (Sarpkaya, Isaacson 1981):

$$\frac{h_{\lim}}{g\tau^2} = C_1 \tanh\left[C_2 \frac{H}{g\tau^2}\right], \tag{5}$$

основанное на гидродинамической теории волн конечной амплитуды. Здесь g – ускорение силы тяжести, t – период волны. По сути (с учетом размерности и с точностью до некоторых констант) знаменатели в левой и правой частях соотношения (5) допустимо соотносить с длиной волны. Следовательно, дробь в левой части имеет смысл крутизны волны. Константы в этой формуле равны $C_1 = 0.02711$ и $C_2 = 28.77$. Константа C_1 определяет предельную крутизну волн конечной амплитуды на глубокой воде, а константа C_2 – учитывает влияние мелководья. В табл. 1 приведены значения $h_{\lim}$ различной обеспеченности (средние, 13%, 3%, 0.1%), вычисленные для трех значений глубин Каспийского моря.

Таблица 1. Предельные высоты волн для различных глубин

Глубина, (м)	Предельная высота $h_{\lim}$ (м)			
	средняя	13%	3%	0.1%
5.5	1.9	2.7	3.3	4.1
4.2	1.4	2.0	2.4	2.9
2.2	0.9	1.3	1.5	1.8

Эти значения учитывают только кинематику индивидуальной волны в точке, и потому могут считаться оценками сверху. Оценка высоты волны, возможной 1 раз в Т лет определяется как квантиль (1–1/Т)×100% – обеспеченности распределения (3), то есть:

$$h_{\mathrm{T}} = \mathrm{A}_1 - \mathrm{B}_1 \mathrm{h}\left[-\mathrm{h}\left[1-\frac{1}{\mathrm{T}}\right]+\mathrm{C}\right], \qquad h_i \le h_{\lim}\,. \tag{6}$$

После расчета оценок средних высот волн $\overline{h}$, возможных 1 раз в 1, 5, 10, 25, 50, 100 лет, по соотношениям (6), можно рассчитать высоты волн других обеспеченностей.

В таблице 2 приведен пример оценок высот волн возможных на различных глубинах 1 раз в год, 5, 10, 25, 50, 100 лет.

Таблица 2. Оценки значительных высот волн (м), возможных 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет на различных глубинах в Северном Каспии

Глубины, м	1	5	10	25	50	100
15	4.0	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7
13	3.2	3.5	3.7	4.0	4.1	4.3
5	1,6	1,8	1,8	1,9	2,0	2,1

Значения параметров из таблицы определены при современном среднем положении уровня моря минус 27 м. Имеются различные сценарии изменения уровня Каспийского моря, в том числе до 2050 г. (Водный баланс, 2016). В частности, допускается, что уровень Каспийского моря не превысит отметки минус 25 м, и не опустится ниже минус 29 м. Очевидно, что в первом случае для мелководного Северного Каспия оценки экстремальных высот волн могут возрасти на несколько процентов, а во втором случае понизиться.

Оценки изменения экстремальных высот волн при различных сценариях изменения уровня моря зависят от глубины места и обеспеченности рассматриваемой оценки (средняя, 13%, 3%, 0.1). Наибольшие изменения следует ожидать в оценках $h_{0.1\%}$ – тем большие, чем меньше глубина места. В качестве экспертной оценки можно допустить, что для глубины 13 м оценки средних высот волн при сценариях – 25 м, и – 29 м почти не изменятся, а для волны $h_{0.1\%}$ эти изменения будут, видимо, находиться в пределах ±(5–7%) от её значения. Конкретные оценки максимальных высот волн при различных сценариях изменения уровня моря – одна из важных проблем изучения волнового климата Каспийского моря – требует отдельного рассмотрения, выходящего за рамки настоящей статьи.

Литература

Боков В.Н., Лопатухин Л.И., Микулинская С.М., Рожков В.А., Румянцева С.А. О межгодовой изменчивости волнения // Проблемы исследования и математического моделирования ветрового волнения. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1995. С. 446–454.

Бухановский А.В., Иванов С.В., Лопатухин Л.И. Подходы, опыт и некоторые результаты исследования волнового климата океанов и морей. / Часть 1: Постановка задачи и входные данные // Вестник С.-Петербург. Ун-та. Сер. 7. Вып. 3. 2005. С. 52–74.

Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Чернышёва Е.С. Оценка волнового климата волн по данным о ветре // Метеорология и Гидрология. 2017. № 9. С. 77–84.

Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. / Моделирование и прогноз. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.

Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. Л.: “Транспорт”, 1974. 359 с.

Лопатухин Л.И. Карты волнения Каспийского моря // Гидрометеорологические карты Каспийского моря. Адм. № 6023. Л.: ГУНиО МО СССР, 1988.

Лопатухин Л.И. Ветровое волнение. / Учебное пособие 2-е дополненное издание. Санкт-Петербург: Санкт Петербургский Государственный университет, 2012. 165 с.

Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Дегтярев А.Б., Рожков В.А. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. Российский Морской Регистр Судоходства. 2003. 213 с.

Лопатухин Л.И., Яицкая Н.А. Особенности подхода к расчету режима ветрового волнения Каспийского моря // Метеорология и Гидрология. 2018. № 4. С. 54–61.

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 // Труды Четвертой Международной конференции “Освоение шельфа арктических морей”. RAO/CIS Offshore 2009. − С. Петербург. 1999. Часть 1. С. 311–318.

Lopatoukhin L.J., Boukhanovsky A.V., Rozhkov V.A. Approach and method of calculation of extreme wind waves in deep and shallow water // Proc. Int. Conference LITTORAL 2000. “Responsible Coastal zone management. The Challenge of the 21st Century”. Period biol, Vol. 102. Supplement 1. Zagreb: 2000. P. 513–517.

Sarpkaya T., Isaacson M. Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold. New York: 1981. 651 p.

CASPIAN SEA WIND AND WAVE CLIMATE

Lopatoukhin L.I.

Saint Petersburg State University. Department of Oceanology. Saint-Petersburg. 199178, Russia, e-mail: leonid-lop@yandex.ru; l.lopatuhin@spbu.ru

Submitted 09.01.2019, accepted 13.12.2019

The modern approach for wind wave climate estimation is presented. The input for wave calculation by numerical models is reanalysis data. For extreme wave estimation in severe storms the reanalysis data has to be corrected (by regression model as an example). For calculations of wind waves in Caspian Sea SWAN model was used. 40 years continues calculations were made. At the first stage calculations performed for whole the sea, and then

these data were used as the first input for detailed calculations for shallow the Northern Caspian Sea. The estimates of extreme wave heights were presented for different depths.

Keawords: wind waves, wave climate, wind, reanalysis, data corrections, extreme wave heights

References

Bokov V.N., Lopatoukhin L.I., Mikulinskya S.M., Rozhkov V.A., and Rumyantseva S.A. O mezhgodovoi izmenchivosti volnenia (About the interannual variability of the wind waves). *Problemy issledovania i matematicheskogo modelirovania vetrovogo volnenia*), Sankt Peterburg: Gidrometeoizdat, 1995, pp. 446–454.

Boukhanovsky A.V., Ivanov S.V., and Lopatoukhin L.I. Podhody, opyt i necotorye resultaty issledovania volnovogo climate oceanov i morey. Chast 1: Postanovka zadachy i vhodnye dannye (Approach, experience and some results of wind wave climate investigations. Part 1. Statement of problem and input), *Vestnik Sanct Peterbugskogo Unversiteta*, Ser. 7, Issue. 3, 2005, pp. 52–74.

Boukhanovsky A.V., Lopatoukhin L.I., and Chernysheva E.S. Otsenka volnovogo klimata po dannym o vetre (Assessment of wave climate of Seas from wind data). *Meteorologia I Gidrologia,* 2017, No. 9, pp. 77–84.

Davidan I.N., Lopatoukhin L.I., and Rozhkov V.A. Veter i volny v okeanah i moruah. Spravochnye dannye (Wind and waves in Oceans and Seas. Reference data), Leningrad*:* "Transport", 1974, 359 p.

Lopatoukhin L.I. Karty volnenia Caspiskogo mora *(W*ave charts of the Caspian Sea). In: Gidometeorologicheskie karty Kaspiskogo moray (Pilot charts. Caspian Sea), Leningrad: Gydrography USSR, 1988.

Lopatoukhin L.I. Vetrovoe volnenie. Uchebnoe posobie, (Wind waves. Textbook. 2nd edition), Sankt Peterburgski Gosudarstvenny Universitet, 2012, 165 p.

Lopatoukhin L.I., Boukhanovsky A.V., Degtuarev A.B., and Rozhkov V.A. Spravochnue dannue po rezhimy vetra i volnenia Barentseva, Okhotskogo i Caspiskogo morey (Wind and wave climate of the Barents, Okhotsk and Caspian Seas. Handbook). Rossisky Morskoi registr sudohodstava (Russian Maritime Register of Shipping*)*, 2003, 213 p.

Lopatoukhin L.I. and Yaitskua N.A. Osobenosti podhoda k raschety rejima volnenia Caspiiskogo mora (Peculiarities of the Approach to Calculation of Wind Waves in the Caspian Sea). *Meteorologia i Gidrologia*, 2018, No. 4, pp. 54–61.

Mirzoev D.A., Zil'bershtein O.I., Lopatoukhin L.I., Mironov E.U., and Mikhailov N.N. Konceptsia obespechenia specializirovannoi gidrometeorologicheskoi informatsii proectirovania sooruzheni na shelfe arcticheskih morei (A conception of Provision Specialized Hydrometeorological information for the design of Structures on the Arctic Seas Shelf). Trudy Chetvertoi mejdunarodnoi konferentsii "Osvoenie shelfa arcticheskih morei". RAO/CIS Offshore 2009, S-Petersburg: 1999, Part 1, pp. 311–318.

Lopatoukhin L.J., Boukhanovsky A.V., and Rozhkov V.A. Approach and method of calculation of extreme wind waves in deep and shallow water. Proc. Int. Conference LITTORAL 2000, "Responsible Coastal zone management, The Challenge of the 21st Century", Period boil., Vol. 102, Supplement 1, Zagreb: 2000, pp. 513–517.

Sarpkaya T. and Isaacson M. Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold. New York, 1981, 651 p.

Vodny balance i kolebania urovnya Caspiskogo mora. Modelirovanie I prognoz (Water balance and water level oscillations of the Caspian Sea), Moscow: Triada ltd, 2016, 378 p.