



Влияние ветра на высоту волн в казахстанской части Каспийского моря

Елтай Айзат^{1,2*}, Наталья Ивкина², Бьёрн Клёве³

¹ Кафедра метеорологии и гидрологии, факультет географии и природопользования, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан

² Управление гидрометеорологических исследований Каспийского моря, Исследовательский центр, РГП «Казгидромет», Республика Казахстан

³ Университет Оулу, научный отдел водных, энергетических и экологических исследований, технологический факультет, Финляндия

* для корреспонденции: yeltay_aizat@mail.ru

Данная версия является переводом статьи «Influence of wind on wave heights in the Kazakh Caspian Sea», опубликованной в журнале 10 января 2020 г.

МРНТИ 37.23.02

doi: 10.29258/CAJWR/2019-R1.v5-1/82-94.rus

Аннотация

С развитием судоходства в Каспийском море возросла потребность в высококачественных данных о характеристиках волн. В настоящей статье анализируются максимальные высоты волн в зоне прибрежных станций в Казахстане на основе данных о волнении и ветре, а также цифрового моделирования с использованием модели SWAN (моделирование волн прибрежной зоны). Исследование позволило выявить влияние постоянного ветра и его направления на высоту волн. Результаты исследования указывают на то, что изменения параметров ветрового волнения зависят от скорости и направления ветра. При скорости ветра ниже 10 м/с расчетная высота волны в бассейне Среднего Каспия может достигать 3 м. На мелководных участках бассейна Северного Каспия высота волн не превышает 2 м. По результатам исследования была составлена первая карта районирования ветров для казахстанской части Каспийского моря.

Ключевые слова: море, постоянный ветер, параметры волн, модель SWAN, карты районирования.

Тип статьи: научная статья.

1. Введение

Каспийское море имеет стратегическое расположение на пересечении международных транспортных путей между Европой и Азией. Богатые природные ресурсы превратили его в динамично развивающийся промышленный, транспортный и

судоходный узел. Для предотвращения кораблекрушений в Каспийском море и увеличения объема перевозок по нему требуется точное прогнозирование его течений и волнений. 13 октября 2011 г. в Каспийском море произошло крушение нефтяного танкера «Григорий Бугров». По сообщениям региональных СМИ в сети Интернет судно получило пробоину и село на мель в 50 км от Тюленьего острова (Юпов, 2011). Оно шло из Туркменистана в Астрахань с 6 тыс. тонн мазута на борту.

Результаты предыдущих исследований ветрового волнения демонстрируют, что значительные волны образуются в море под воздействием ветров, дующих с запада на север (Ivkina and Stroeve, 2005; Ivkina et al., 2006). Во второй половине 19-го и начале 20-го вв. диапазон параметров волн, идущих с севера на юг, расширился, и было показано, что глубина моря играет важную роль в образовании волн в мелководной северной части Каспия (Yaitskaya, 2017). Однако малочисленность сетей гидрометеорологического мониторинга приводит к нехватке соответствующих данных о регионе. Кроме того, характеристики волн не наблюдаются в открытой части моря, что затрудняет анализ и прогнозирование их параметров.

Цель исследования заключалась в расширении знаний о специфике волн в Каспийском море. При написании статьи для демонстрации характеристик ветра и волн (высота и период волны) в море использовались данные станций в казахстанской части Каспийского моря и расчеты, произведенные на основе модели SWAN. Особое значение и актуальность имел анализ волнового режима, который главным образом заключался в распределении скорости и направлений преобладающих ветров. Это позволило расширить данные по междугодовой изменчивости волн и долгосрочным колебаниям их высоты. Таким образом, наряду с изучением состояния волн анализировались и соответствующие ветровые режимы.

2. Материалы и методы

2.1. Район исследования в Каспийском море

Каспийское море представляет собой бессточный водоем, находящийся на территории Российской Федерации, Республики Казахстан, Туркменистана, Исламской Республики Иран и Республики Азербайджан, состоящий из трех основных частей (бассейнов) с разной глубиной. Каспийское море имеет важное значение с точки зрения рыболовства, экологии, отдыха и транспорта. Самая северная часть моря мелководная и зимой покрывается льдом. Глубоководная южная часть расположена в умеренном климате и не замерзает.

Основные транспортные маршруты в Каспийском море проходят от Актау до Баку и Махачкалы (Рис. 1). Ключевыми казахстанскими портами являются Актауский морской торговый порт и порт Курык – многофункциональные терминалы обеспечивающие непрерывную перевозку грузов в течение всего года с востока на запад, с севера на юг и в обратных направлениях. Они расположены на пересечении крупнейших транспортных коридоров региона и играют стратегическую роль в развитии Казахстана (Port Kuryk, n.d.).

2.2. Климат и ветры Каспийского моря

Климат Каспийского моря и прилегающих к нему территорий зависит от циркуляции атмосферного воздуха над Евразийским континентом. Зимой в бассейне северного Каспийского моря формируются холодные арктические погодные условия. В это же время к морю поступает воздух с гористой территории Ирана, и в результате столкновения этих двух воздушных потоков под высоким давлением в середине моря образуется циклонная воздушная масса. Кроме того, на Каспий также влияют Черноморский и Средиземноморский циклоны. Весной Сибирский антициклон и Средиземноморский циклон перемещаются в восточном и северо-восточном направлениях, что ведет к частой смене метеорологических процессов и воздушных потоков. Летом температурные контрасты сглаживаются, а циркуляционные процессы в нижних и верхних слоях атмосферы ослабевают. В этот период Азорский антициклон оказывает максимальное воздействие на метеорологические процессы над Каспием. К середине осени влияние Азорского антициклона начинает снижаться, с востока поступает континентальный воздух, и усиливается атмосферное воздействие с запада (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas, 1992; Arpe et al., 2019).

Максимальные ветры образуются после формирования Сибирского антициклона, когда в юго-восточном направлении возникают условия наибольшего градиента давления. Летом возрастает частота западных ветров, что связано с частым прохождением циклонов с Атлантического океана через Западный Казахстан и южную часть Урала (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas, 1992).

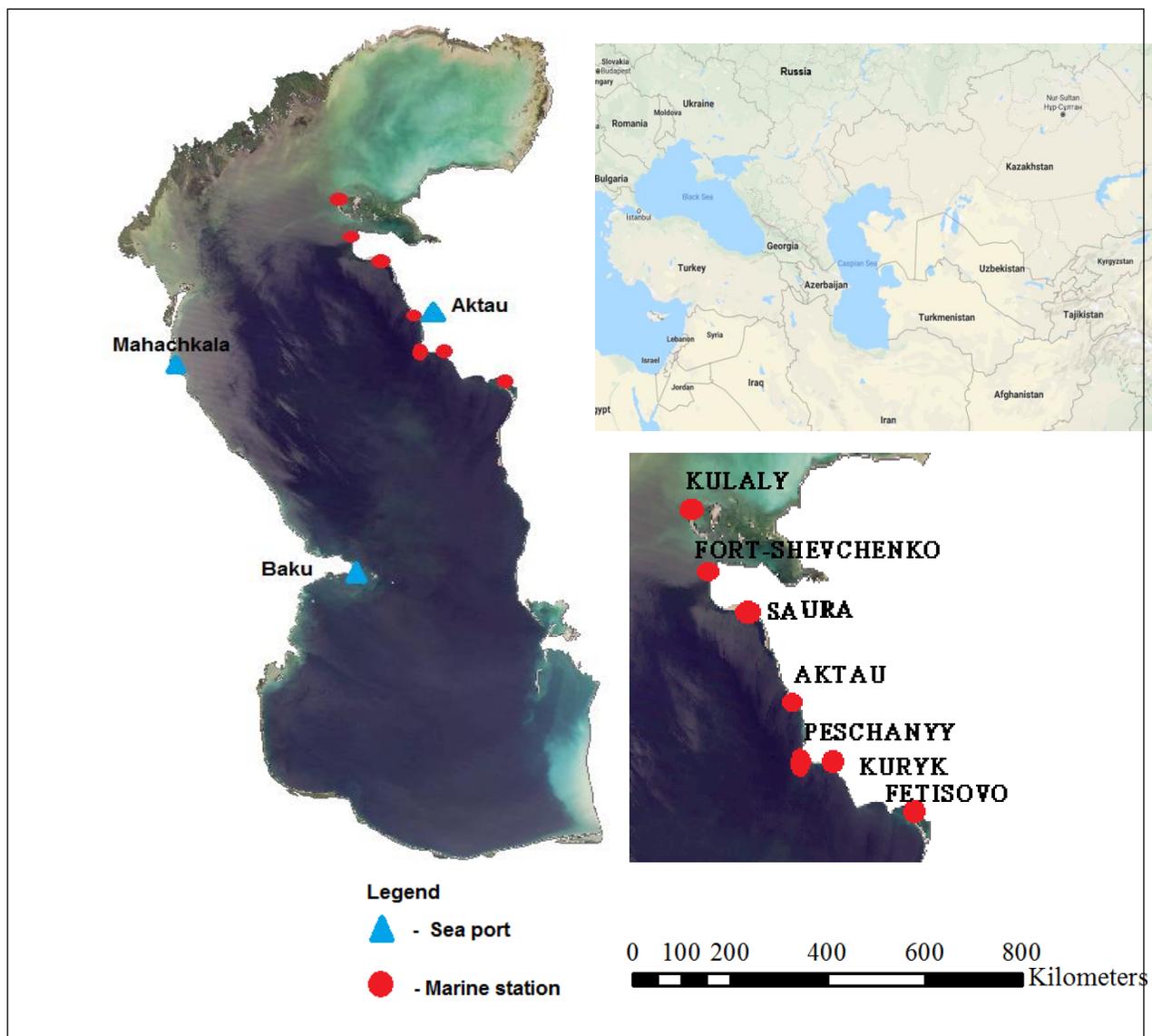


Рисунок 1. Порты Каспийского моря и морские измерительные станции в Казахстане (космический снимок MODIS).

2.3. Мониторинг ветра и волнения в казахстанской части Каспийского моря

Касающиеся Казахстана наблюдения проводятся в прибрежных водах Каспийского моря на 10 морских станциях: Иголкинская банка, Жанбай, Пешной, остров Кулалы, Форт-Шевченко, Актау, Песчаный, Фетисово, Саура, Курык. Измерения характеристик волн выполняются на 7 из них (см. Рис. 1). На этих гидрометеорологических морских станциях проводятся наблюдения за такими характеристиками, как скорость и направление ветра, высота и направление волн, температура воды и воздуха, уровень воды, соленость морской воды. Использованные данные о высоте и направлении волн были получены со станций Актау, Форт-Шевченко и остров Кулалы. Сбор данных осуществлялся в 00, 06, 12, 18 ч. по СГВ. Расположение станций показано на Рис. 1. Данные собирались в период

с 1980 по 2017 гг. (Табл. I).

В рамках исследования был выполнен анализ имеющихся результатов наблюдений за направлением и скоростью ветра на станциях Актау, о. Кулалы и Форт-Шевченко в период с 1980 по 2017 гг. Анализ результатов наблюдений за направлением и скоростью ветра выполнялся на основе четырехлинейного анализа ветра на 10-метровом горизонте этих станций. Данные о ветре (скорость и направление) являются полными, за исключением нескольких пробелов во времени наблюдения, что в целом делает их пригодными для статистической обработки.

2.4. SWAN-моделирование

Моделирование волнения по значениям постоянного ветра в разных направлениях выполнялось по модели SWAN (моделирование волн прибрежной зоны). Модель была разработана на факультете гражданского строительства и наук о Земле Делфтского технического университета, Нидерланды. В исследовании использовалась версия 41.01A модели (Техническая документация SWAN, 2007). Значения высот значительных волн обозначены как H_s в метрах и определялись по следующей формуле:

$$H_s = 4\sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad (1)$$

где, $E(\omega, \theta)$ – спектр плотности дисперсии и ω – абсолютная циклическая частота, определяемая отношением смещенной дисперсии эффекта Доплера. Однако для облегчения расчета H_s можно рассчитывать и по формуле ниже:

$$H_s = 4\sqrt{\iint E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \quad (2)$$

Ивкина и Галаева адаптировали эту модель к условиям казахстанской части Каспийского моря (Ivkika et al., 2016; Ivkika et al., 2017).

В качестве вводных модели использовались данные о ветровом режиме (скорость, направление), батиметрические данные и нерегулярная триангуляционная сетка Каспийского моря, а также координаты точек, для которых было необходимо произвести расчеты.

Моделирование волнения под воздействием постоянного ветра включает следующие этапы:

- подготовка входных данных;
- разработка кода для программы, иницилирующей процесс моделирования;
- получение результатов моделирования и их визуализация в приложении ArcGIS.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Характеристики ветра

Среднегодовая скорость ветра в казахстанской части Каспийского моря составляет 4-5 м/с. В зимние месяцы в среднем преобладают восточные ветры. Максимальная скорость ветра варьируется в диапазоне 22-28 м/с и, как правило, наблюдается в холодное

время года – с октября по март. Минимальные показатели скорости ветра характерны для летних месяцев – с июня по август – и составляют 2,4 и 3,8 м/с на севере и 4,7 и 5,2 м/с на юге (Рис. 2-3).

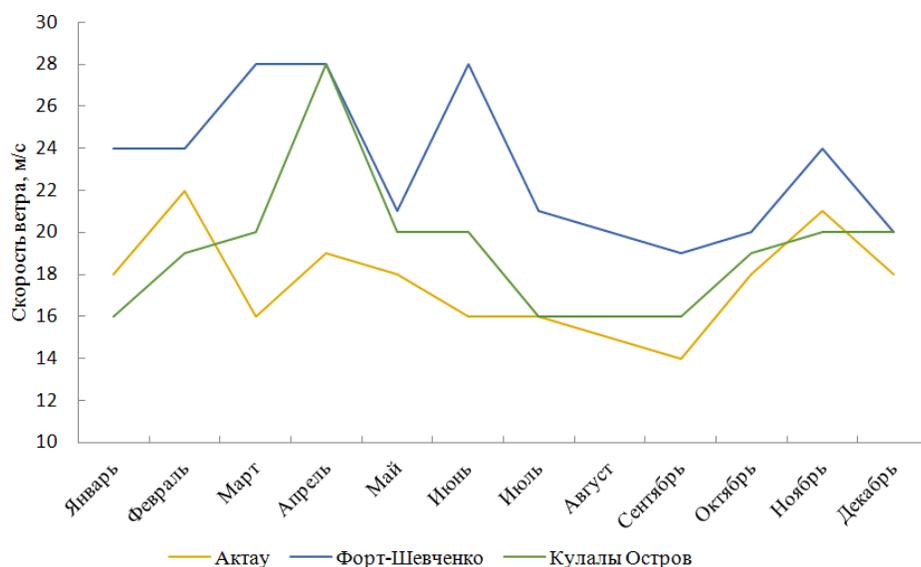


Рисунок 2. Максимальная месячная скорость ветра в Актау в период 1980-2017 гг., в Форт-Шевченко в период 1993-2017 гг. и на острове Кулалы в период 2001-2017 гг.

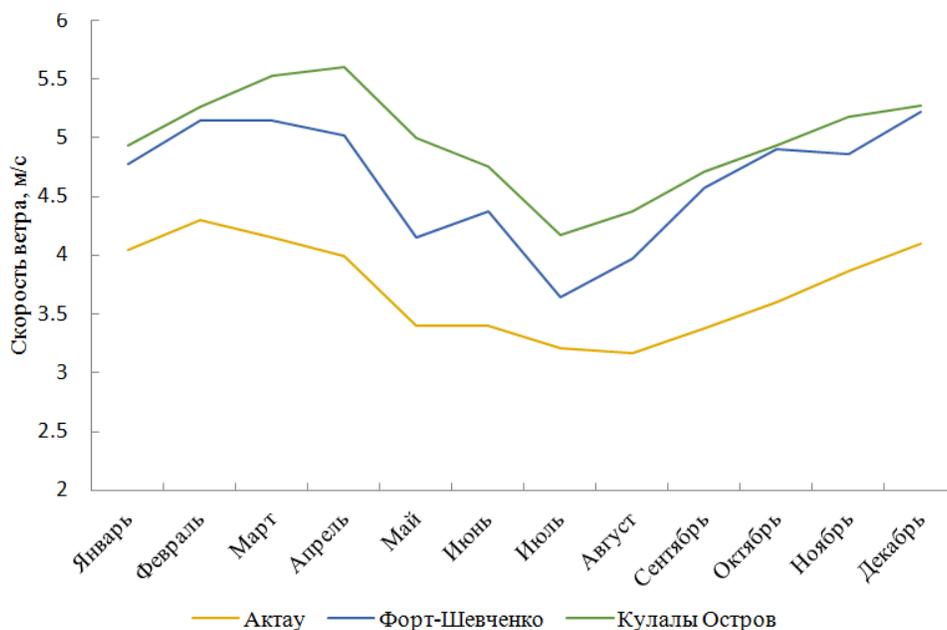


Рисунок 3. Среднемесячная скорость ветра в Актау в период 1980-2017 гг., в Форт-Шевченко в период 1993-2017 гг. и на острове Кулалы в период 2001-2017 гг.

Максимальная высота волн в казахстанском секторе Северного Каспия возле острова Кулалы может достигать 3 м. Значительные и сильные волны, как правило, формируются западными и северными ветрами. Высокие волны могут образовываться в результате

даже более умеренных ветров, сохраняющих устойчивое направление более 24 часов.

Таблица I. Береговые станции, периоды измерений, средние и максимальные скорости ветра и высоты волн.

Станция	Период, гг.	Сред. скорость ветра, м/с	Макс. скорость ветра, м/с	Сред. высота волн, м	Макс. высота волн, м
Актау	1980-2017	3,7	22	0,20	4,5
Форт-Шевченко	1993-2017	4,7	28	0,33	2,5
о. Кулалы	2001-2017	5	24	0,49	3

3.2. Анализ высоты волн

Результаты анализа высоты волн по данным береговых станций указывает на то, что наиболее распространенными являются волны ниже 0,5 м (Табл. II). Средняя высота волн для Актау составляет 0,20 м, для Форт-Шевченко – 0,33 м, и для о. Кулалы – 0,49 м. Анализ частоты волн разной высоты на станциях показал, что за все годы визуального измерения высоты волн максимальное значение достигало 4,5 м в районе г. Актау. Можно сделать вывод о том, что образование волн высотой более 4 м возможно, но крайне редко.

Таблица II. Стабильность высоты волн по станциям.

Станция	Высота волн, м								
	<0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	4-4,5
Актау	24 392 (88,8%)	17 426 (6,3%)	890 (3,2%)	253 (0,9%)	138 (0,5%)	44 (0,2%)	18 (0,1%)	4 (0,01%)	1 (0 004%)
Форт-Шевченко	14522 (62,9%)	7589 (32,9%)	778 (3,4%)	170 (0,7%)	13 (0,1%)	1(0,004%)	-	-	-
Остров Кулалы	6478 (32,9%)	00447 (53,0%)	2205 (11,2%)	396 (2,0%)	164 (0,8%)	8(0,04%)	1 (0,01%)	-	-

На станциях отмечены разные характеристики ветра и волн. В районе Форт-Шевченко в течение всего года наблюдаются значительные ветры. Высокие волны характерны для зимнего (январь-февраль), весеннего (март-апрель) и осеннего (октябрь-ноябрь) периодов. В районе Актау волновые процессы более развиты. В каждом месяце регистрируются волны высотой более 1,5 м. Высокие волны наблюдались в течение всего года, но наиболее интенсивные волновые процессы, как и в районе Форт-Шевченко, развиваются зимой (декабрь-февраль), весной (март-апрель) и осенью (октябрь-ноябрь). У острова Кулалы в течение всего года наблюдается максимальное волнение высотой более 2 м, но в ноябре и весной оно выражено наиболее ярко (Рис. 4).

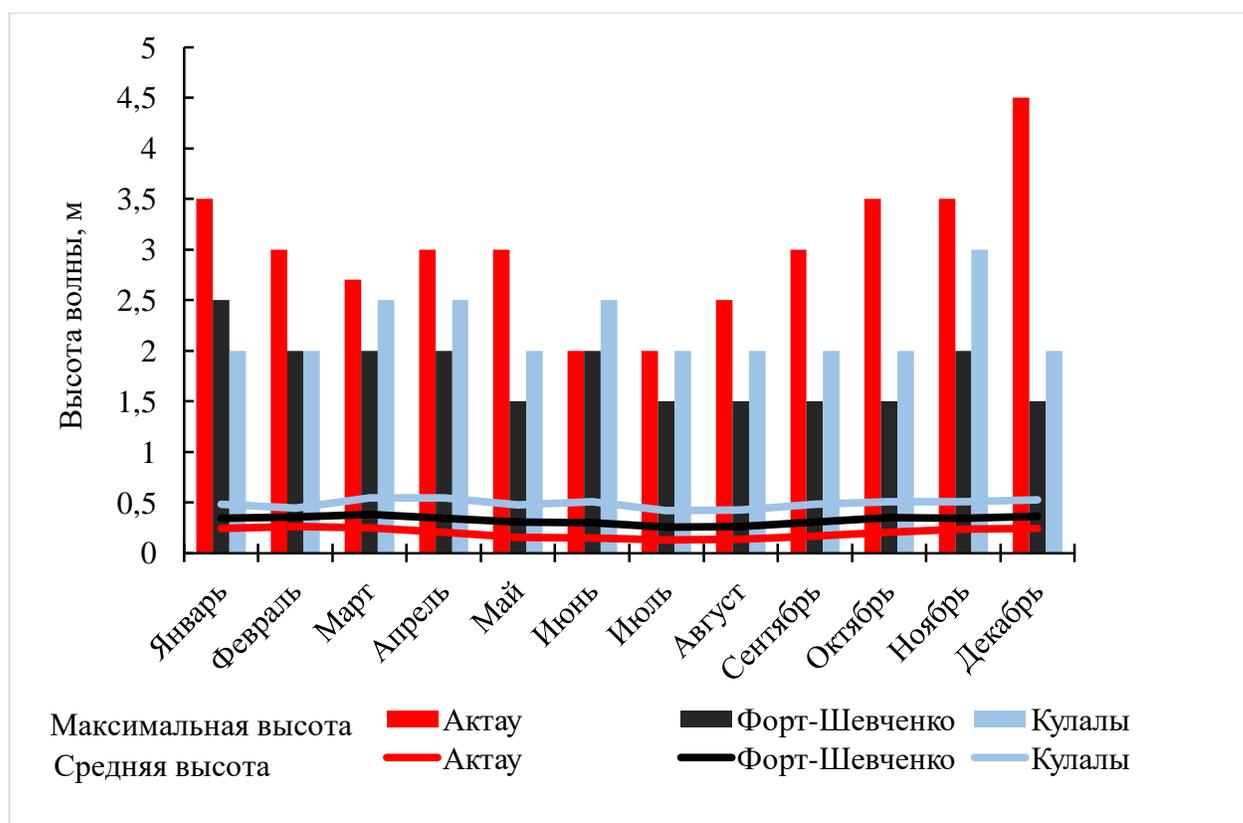


Рисунок 4. Среднемесячная и максимальная высота волн в Актау в период 1980-2017 гг., в Форт-Шевченко в период 1993-2017 гг. и на острове Кулалы в период 2001-2017 гг.

3.3. Карты районирования максимальных волн

На картах районирования ветрового волнения в казахстанской части Каспийского моря показаны зоны с высотой волн в зависимости от скорости и направления ветра (Рис. 5). На морских станциях ведется визуальное наблюдение за волнами. Степень волнения характеризуется высотой наблюдаемых волн. Высота волны определяется визуально в соответствии с оценкой пяти наиболее заметных и крупных волн, прошедших перед наблюдателем за 5 минут. Для преобразования высоты волн в степень волнения

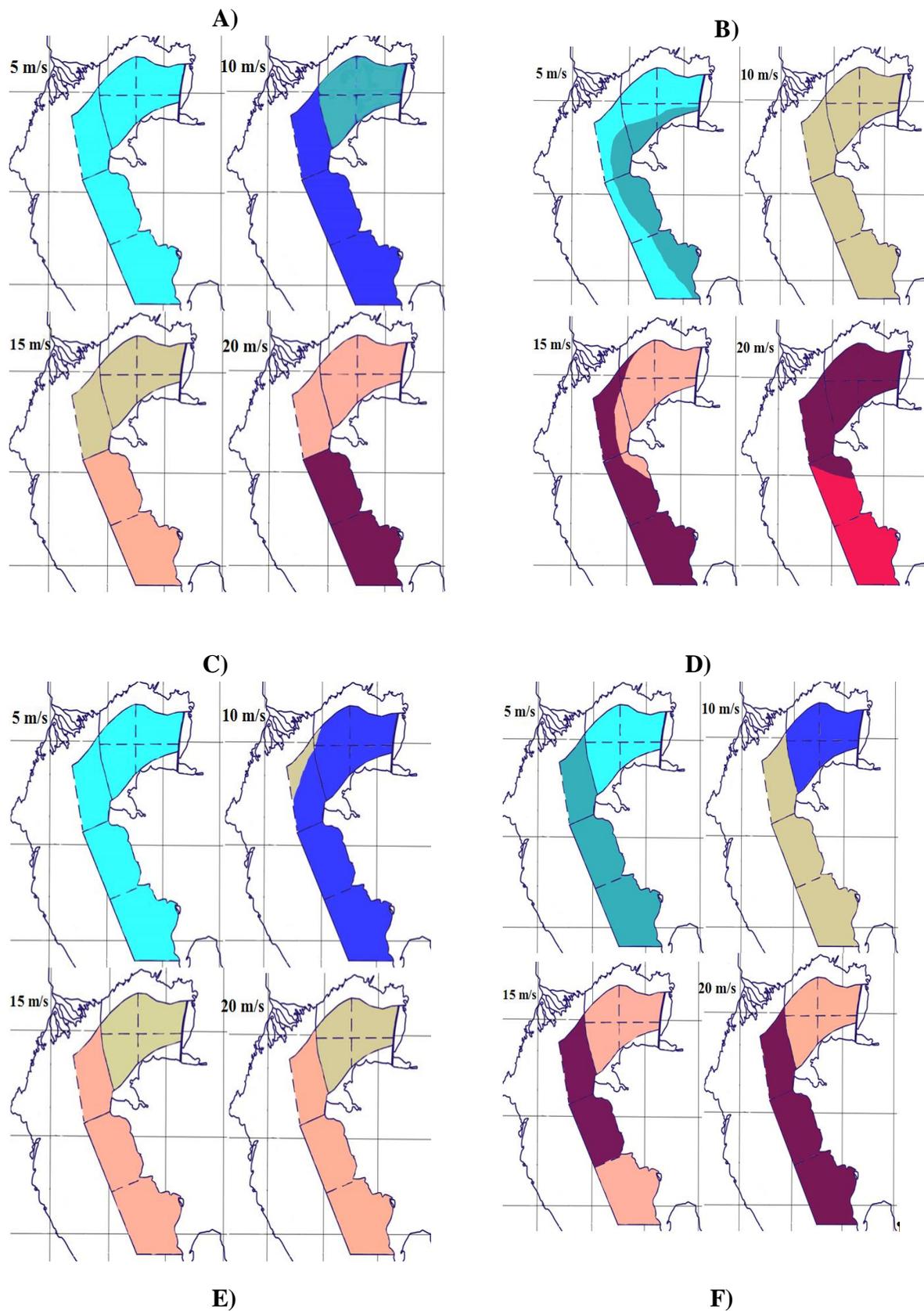
используется шкала количества волн (Табл. III) (Korovin and Timets, 2000).

Таблица III. Шкала силы волнения.

Высота волн, м	Классификация ветра	Баллы	Цветовой код района
0	Неприменимо	0	
до 0,25	Слабое	I	
0,25-0,75	Умеренное	II	
0,75-1,25	Значительное	III	
1,25-2,00	Значительное	IV	
2,00-3,50	Сильное	V	
3,50-6,00	Сильное	VI	
6,00-8,50	Очень сильное	VII	
8,50-11,0	Очень сильное	VIII	
>11	Исключительный	IX	

В основу карты районирования лег «Атлас районирования морей и океанов для гидрометеорологического обеспечения морской деятельности», составленный Росгидрометом в 2009 г. Карты составлялись по данным о неизменных ветрах, т.е. сохраняющих свою скорость и направление в течение 3-х дней, с использованием модели SWAN и следующих параметров ветра: 5, 10, 15, 20 м/с и 8 направлений (С., С.-В., З., Ю.-В., Ю., Ю.-З., З., С.-З.).

Результаты анализа карт показали, что при слабом ветре, дующем в северо-восточном, юго-восточном, юго-западном и северо-западном направлениях, высота волн может достигать 1,25 м, а самые маленькие волны наблюдаются при ветре в западном направлении. При сильном ветре скоростью 10 м/с максимальная высота волны может достигать 3,5 м в Среднем Каспии, а в северной части моря в зависимости от глубины волны могут достигать 1,25 м. При скорости ветра 15 м/с высота волны в водах казахстанской части Каспийского моря составляет от 2 м в Северном до 7 м в Среднем Каспии. Согласно результатам моделирования самые высокие волны могут образовываться в Среднем Каспии при ветре, дующем со скоростью 20 м/с в северо-западном и юго-западном направлениях.



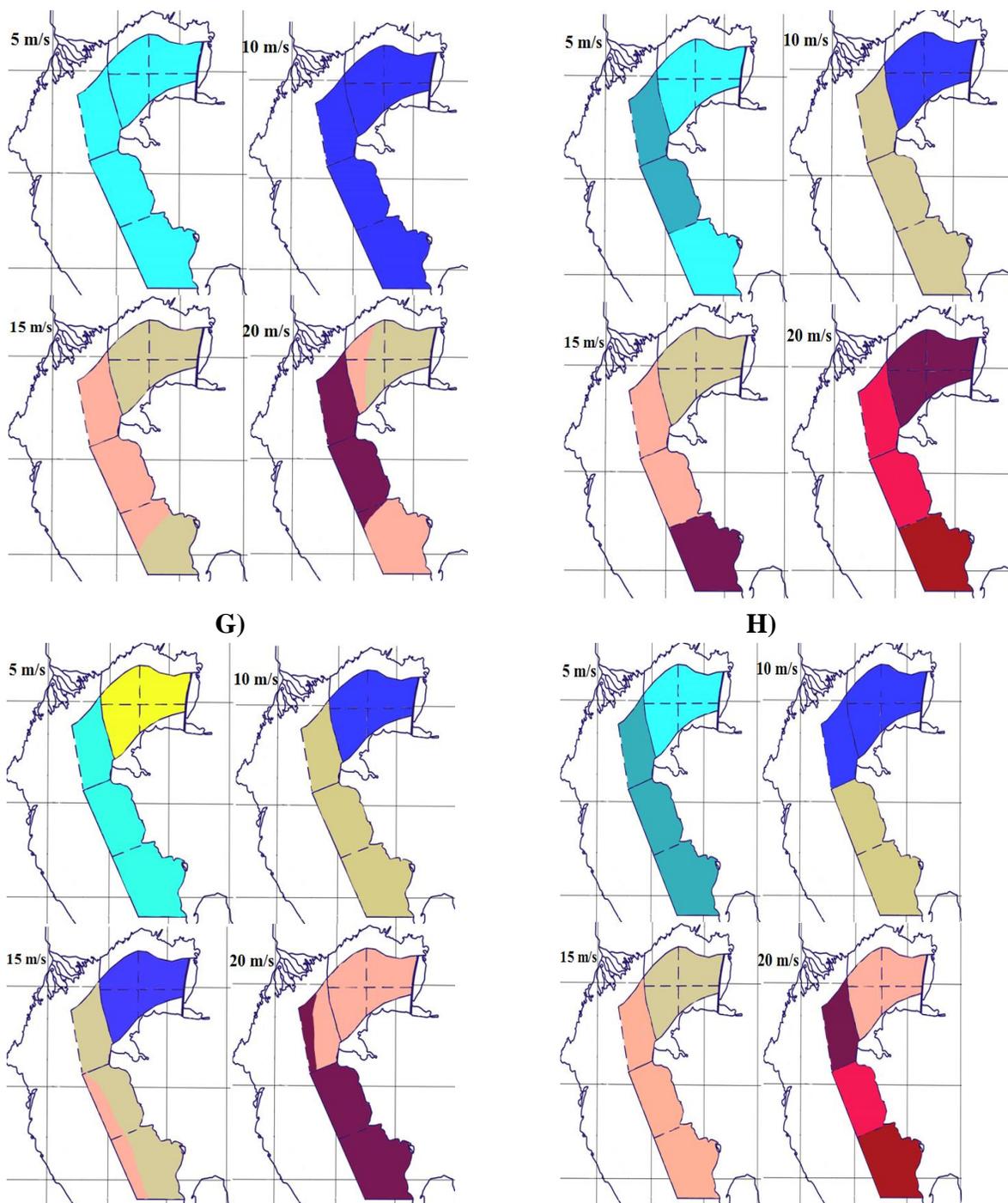


Рисунок 5. Карты районирования казахстанской части Каспийского моря по высоте волн в баллах при ветре разных направлений: А) север, В) северо-восток, С) восток, D) юго-восток, E) юг, F) юго-запад, G) запад, H) северо-запад.

4. Заключение

Карты волнения в Каспийском море необходимы для целей морского судоходства и международных грузоперевозок. Они могут служить источниками информации и помогать в предотвращении крушений в море. Для составления карт волнения были проанализированы характеристики ветра и волн в казахстанском секторе моря. Результаты исследования демонстрируют, что характеристики волн в северной части Каспийского моря зависят от глубины. На мелководье высота волн достигает 1 м, а на большой глубине – 3 или более метров. Самые высокие волны в этой зоне образуются под воздействием ветра со скоростью более 15 м/с в северо-западном и юго-западном направлениях. Модель SWAN доказала свою достоверность при прогнозировании высоты и направления волн в глубокой средней части моря. Однако все еще необходимо проанализировать и отредактировать результаты моделирования высоты волн для районов в мелководной северо-восточной части Каспийского моря, поскольку в некоторых зонах смоделированная высота волн оказалась очень большой, что нетипично для региона. Полученные результаты позволили составить первые карты волнения в казахстанской части Каспийского моря, которые можно использовать в качестве руководства при составлении судоходных маршрутов.

Список источников

1. Arpe, K., Tsuang, B., Tseng, Y., Liu, X. and Leroy, S., 2019, “Quantification of climatic feedbacks on the Caspian Sea level variability and impacts from the Caspian Sea on the large-scale atmospheric circulation”, *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 136, pp. 475–488.
2. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas, 1992, Vol. VI. Caspian Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions. SPb.: Gidrometeoizdat, 359 p.
3. Ionov, O. “Experts believe that the cause of the accident of the tanker "Grigori Bugrov" off the coast of Dagestan was a collision with an underwater object”, *Caucasian Knot*. Available at: <https://www.kavkaz-uzel.eu/articles/194142/> [15 December 2018].
4. Ivkina, N.I. and Galayeva A.V., 2017, “Prediction of Wind Waves in the Caspian Sea Using the SWAN Model”, *Hydrometeorology and Ecology*, Vol. 2 No 85, pp. 36-45.
5. Ivkina, N.I. and Galayeva, A.V., 2016, “On the application of the SWAN spectral wave model for forecasting waves in the Caspian Sea // Water Resources of Central Asia and their use: Mater. International Scientific - practical Conf., devoted to summing up the results of the decade declared by the UN “Water for Life”, Almaty, 2016, pp. 103-107.
6. Ivkina, N.I., and Stroeva, T.P., 2005, “Features of excitement in the shallow northern part of the Caspian Sea”, *Hydrometeorology and Ecology*, Vol. 4 No 39, pp. 54-61.
7. Ivkina, N.I., Stroeva, T.P. and Sokolova L.M., 2006, “Unrest in the Kazakhstan sector of the middle Caspian” *Hydrometeorology and Ecology*, Vol. 1 No 40, pp. 88-97.
8. JSC NC”Aktau, 2018, “Sea commercial Port”. Available at: <https://www.portaktau.kz> [20 November 2018].

9. Korovin, V.P. and Timets, V.M., 2000, “Methods and means of hydrometeorological measurements (Oceanographic work)”, Hydrometeoizdat, St. Petersburg.
10. ”Port Kuryk”, 2018. Available at: <https://www.portkuryk.kz> [20 November 2018].
11. SWAN Technical Documentation, SWAN Cycle III version 40.51A. – Netherlands: University of Technology, Delft, 2007. 98 p. Available at: <http://swanmodel.sourceforge.net/>.
12. Yaitskaya, N.A., 2017, “Retrospective analysis of wind waves in the Caspian Sea in a second half of the XX – beginning of the XXI century and its connection with the regional climate changes”, Geographical bulletin, Vol. 2 No 41, pp. 57-70.