

УДК 551.465

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ЯПОНСКОГО МОРЯ, ВЫЗВАННЫЕ ПРОХОЖДЕНИЕМ ТАЙФУНОВ МАЙСАК И ХАЙШЕН В СЕНТЯБРЕ 2020 г.

© 2023 г. Д. А. Смирнова^{1, 2, *, **}, И. П. Медведев²¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*e-mail: dasha@a-smirnov.com**e-mail: moscowdadas@gmail.com

Поступила в редакцию 18.08.2022 г.

После доработки 07.12.2022 г.

Принята к публикации 16.12.2022 г.

Данное исследование посвящено экстремальным колебаниям уровня моря, полученным с мареографов на побережье Японского моря во время прохождения тайфунов Майсак и Хайшен в сентябре 2020 года. Основное внимание уделено штормовым нагонам, сейшам и инфрагравитационным волнам (ИГ-волнам), выделенным из временных рядов на основе гармонического и статистического анализов. В большинстве случаев штормовые нагоны, сформированные под совместным влиянием изменений атмосферного давления и сильного ветра, играли ключевую роль в экстремальном подъеме уровня моря. Для российского и японского побережий наиболее значительным по силе оказался первый тайфун, Майсак, а на юго-восточном берегу Корейского полуострова наибольшие колебания уровня моря были вызваны вторым циклоном, Хайшеном. Во всех пунктах прошедшие шторма стали причиной образования собственных колебаний в бухтах и заливах. Максимальный размах высокочастотных колебаний с периодами от двух до семи минут, вызванных ИГ-волнами, был зафиксирован в Преображении и составил 2 м. Наблюдаемые различия в колебаниях уровня моря обусловлены топографическими особенностями соответствующих пунктов побережья. Статистический анализ рядов атмосферного давления и скорости ветра, взятых с метеостанций и из реанализа ERA5, показал, что атмосферное давление воспроизводится реанализом с достаточно большой точностью, а скорость ветра на разных станциях имеет существенные расхождения, вызванные локальными особенностями конкретных районов.

Ключевые слова: Японское море, записи мареографов, Майсак, Хайшен, штормовой нагон, тайфун, сейши

DOI: 10.31857/S0030157423050179, **EDN:** VCYZBI

1. ВВЕДЕНИЕ

В первых числах сентября 2020 г. на побережья России, Кореи и Японии обрушились два тайфуна¹ 4-й категории, Майсак и Хайшен, со скоростями ветра более 215 км/ч (60 м/с) в открытом море [4]. Тайфуны в этом регионе — явление достаточно частое, но “дуплет” столь сильных событий, вызвавших катастрофические последствия, является экстраординарным. Оба тропических циклона оставили после себя значительные разрушения; на суше было нарушено функционирование инфраструктуры прибрежных городов, остановлена работа двух южнокорейских атомных станций, затоплены порты. На море тайфуны

привели к не менее серьезным последствиям: повреждению судов в портах, выносу японского судна в море, северокорейского — на берег.

Данные портала NOAA Historical Hurricane Tracks [4] показывают, что с 1945 по 2020 гг. над акваторией Японского моря было зафиксировано 395 событий различной категории (от 1 до 5) на разных стадиях развития циклонов (~5 событий в год). Период наиболее активного образования тайфунов приходится на конец лета—начало осени. В это время происходит перестройка атмосферы с “летнего” типа на “зимний”, связанная со сменой атмосферных структур, определяющих метеорологические условия региона (Азиатский и Гавайский максимумы и Алеутская депрессия) [2]. По мере приближения тайфунов к берегу возрастает роль орографии суши и локальных особенностей прибрежной зоны [1].

¹ “Тайфун” — это название, используемое для тропических циклонов, образующихся в северо-западной части Тихого океана [2].

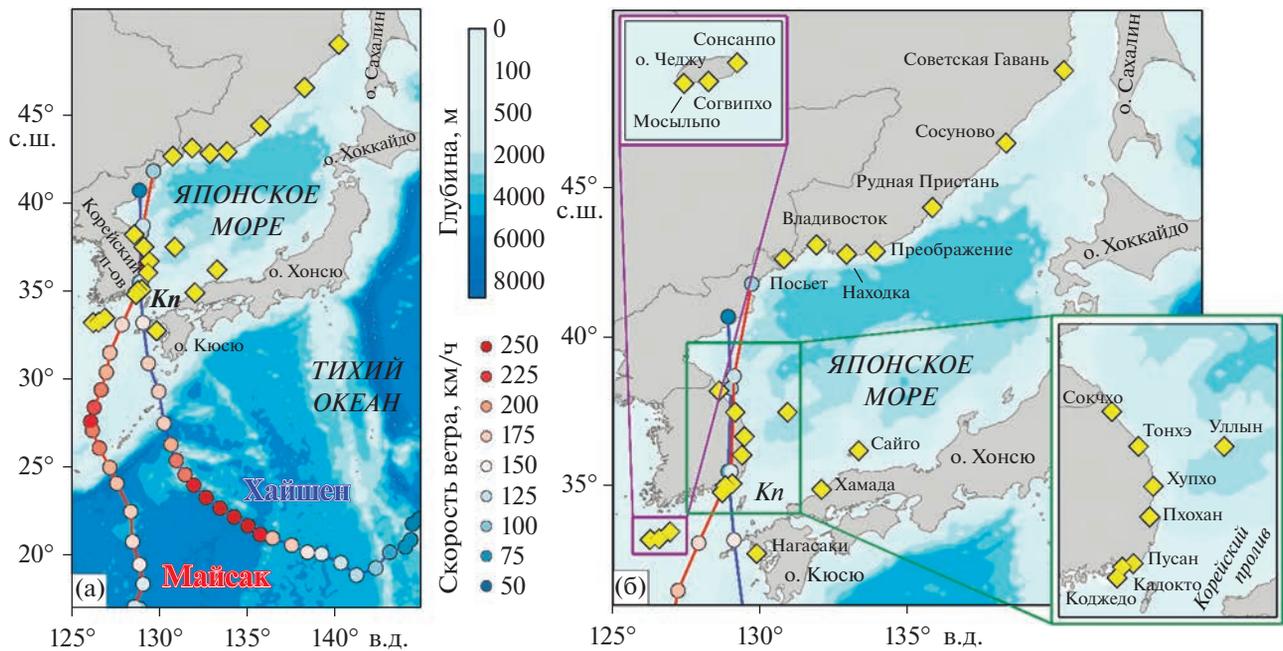


Рис. 1. Район исследования, траектории тайфунов (слева) и расположение станций (справа). Красная линия отражает траекторию тайфуна Майсак, синяя — тайфуна Хайшен. Цвет кружков вдоль траекторий тайфунов отображает максимальную скорость ветра (шаг по времени – 6 часов). Условные обозначения: *Кп* — Корейский пролив.

Прохождение тропических циклонов в сентябре 2020 г. привело к ряду разрушительных природных явлений: сильный ветер, обильные осадки, речные наводнения, экстремальные штормовые волны и интенсивные колебания уровня моря. Основное внимание данной работы было сфокусировано на исследовании экстремальных изменений уровня моря вдоль побережья Японского моря. Записи колебаний уровня моря, полученные с прибрежных самописцев, представляют собой суперпозицию волн различной природы. В их число входят штормовые нагоны, приливы, сейши и инфрагравитационные волны (см., например, [11, 15, 17]).

Прохождение друг за другом двух тропических циклонов (тайфунов 4-й категории) через практически идентичный набор станций дало нам возможность сопоставить характер наблюдавшихся колебаний и тщательно проанализировать широкий спектр волн, вызванных этими циклонами. Исследование некоторых физических особенностей колебаний уровня моря, образовавшихся в результате воздействия первого тайфуна (Майсак), описано в работе [17]. Непосредственно сами тайфуны, с разных точек зрения, были изучены в работах [10, 14, 23]; в этих работах, в частности, были рассмотрены их траектории с учетом термодинамических процессов (в том числе, термического следа) в районе их прохождения и проведена оценка влияния топографии на интенсивность выпадения осадков, приводящих на суше

к не меньшим, чем волны, разрушениям. Настоящая работа является продолжением исследования, начатого в работе [17], с использованием существенно большего количества станций и включающего анализ двух событий. Проводятся оценки влияния топографии и вынуждающей силы на формирование колебаний уровня моря на отдельных станциях и, главное, сравнение реакции уровня моря на этих станциях на прохождение двух последовательных тайфунов с различными динамическими характеристиками.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использовались данные 7 российских, 11 южнокорейских и 3 японских прибрежных мареографов, установленных в портах разной степени защищенности от влияния волн открытого моря. Они получены с открытых порталов ИОС² мониторинга колебаний уровня моря [9] и Российской службы предупреждения о цунами [6]. Расположение пунктов показано на рис. 1; информация об их координатах, государственной принадлежности и количестве пропусков в данных представлена в табл. 1. Записи взяты за 3.5 месяца, с 01.06 по 16.09.2020 г. Временная дискретность данных составляла 1 мин с вертикальным разрешением 1 см. Во временных рядах самописцев

² ИОС = Intergovernmental Oceanographic Commission UNESCO — Межправительственная океанографическая комиссия ЮНЕСКО.

Таблица 1. Информация об анализируемых станциях

Пункт	Страна	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Доля пропусков, %
Советская Гавань	Россия	48.97	140.29	1.67
Сосуново	Россия	46.53	138.33	0.02
Рудная Пристань	Россия	44.37	135.83	0.00
Преображение	Россия	42.90	133.90	0.04
Находка	Россия	42.80	132.92	0.00
Владивосток	Россия	43.11	131.90	0.01
Посьет	Россия	42.65	130.80	0.08
Сокчхо	Южная Корея	38.21	128.59	0.02
Тонхэ	Южная Корея	37.49	129.14	9.00
Улын	Южная Корея	37.49	130.91	0.31
Хупхо	Южная Корея	36.68	129.45	1.80
Сайго	Япония	36.20	133.33	0.55
Пхохан	Южная Корея	36.05	129.37	8.11
Пусан	Южная Корея	35.09	129.04	0.03
Кадокто	Южная Корея	35.02	128.81	1.37
Хамада	Япония	34.90	132.07	0.55
Коджедо	Южная Корея	34.80	128.70	0.13
Сонсанпо	Южная Корея	33.47	126.93	5.77
Согвипхо	Южная Корея	33.24	126.56	0.09
Мосьльпо	Южная Корея	33.21	126.25	0.00
Нагасаки	Япония	32.74	129.87	0.55

трех корейских станций пропущены периоды максимальных значений уровня моря во время прохождения Майсака (Хупхо, Кадокто) и Хайшена (Сонсанпо). Вероятно, это связано с техническими сложностями в работе приборов при прохождении разрушительных тайфунов (отсутствие электрического питания, непосредственные повреждения и пр.).

Помимо записей колебаний уровня моря, использовались данные скорости ветра на высоте 10 м и атмосферного давления на уровне моря на метеостанциях с портала RP5 [3] и из реанализа ERA5 [12] с временной дискретностью 1 час и пространственным разрешением 0.25°.

Исследование основано на применении гармонического и статистического анализов временных рядов. На основе приливного анализа были получены гармонические постоянные и рассчитаны приливные колебания уровня моря, которые вычитались из исходных записей. Остаточные ряды с помощью скользящего среднего с окном в 3 часа (180 значений) были разделены на низко- (НЧ) и высокочастотные (ВЧ) колебания уровня моря (рис. 2). Средний уровень моря (далее СУМ) рассчитывался как среднее значение неприливых (остаточных) изменений уровня моря за анализируемый период наблюдений (3.5 месяца). Отсутствующие данные, за исклю-

чением длительных пропусков во временных рядах Хупхо, Кадокто и Сонсанпо, были заполнены с помощью линейной интерполяции.

3. СИНОПТИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ (ТАЙФУНЫ МАЙСАК И ХАЙШЕН)

Тайфуны Майсак и Хайшен – два тропических циклона, образовавшиеся в Тихом океане, вышедшие к Японскому морю 2 и 7 сентября соответственно, прошедшие над восточной частью Корейского полуострова и распавшиеся над материком (рис. 3). Первый сформировался 27.08.2020 г. к востоку от Филиппинских островов в районе 15° с.ш. 132° в.д., второй – севернее, в 200 милях к востоку от о. Гуам, 30.08.2020 г. Экстремально низкие значения атмосферного давления и максимальные скорости ветра были зафиксированы над Тихим океаном к юго-востоку от Японии. Иными словами, к исследуемому району они подошли на стадии относительного затухания. Стоит отметить, что тайфун Хайшен превосходил по мощности Майсак (910 гПа с порывами ветра до 250 км/ч (69.4 м/с) и 935 гПа с порывами ветра до 230 км/ч (64.0 м/с) соответственно), но большее влияние на уровень моря в прибрежных районах Японского моря оказал именно первый

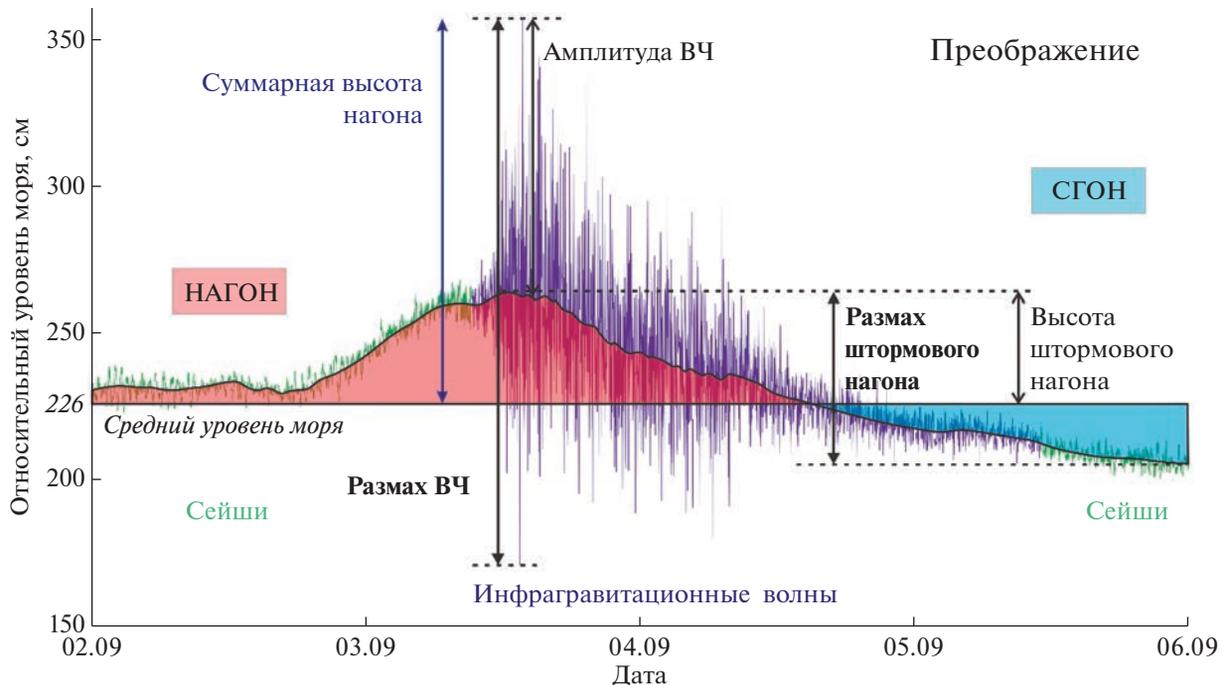


Рис. 2. Элементы неперiodических колебаний уровня моря на примере записи на станции Преображение с 02.09. по 05.09.2020 г включительно. Зеленая линия показывает те колебания уровня моря, которые относятся к сейшам, фиолетовая — к инфрагравитационным волнам; закрашенная красная область — это штормовой нагон, синяя — сгон. Стрелки отражают то, что в тексте называется высотой, амплитудой и размахом колебаний уровня моря в разных частотных диапазонах.

тайфун, потому что на момент выхода к Корейскому проливу он был сильнее.

Изменения скорости ветра и атмосферного давления до, после и во время событий в шести различных пунктах побережья Японского моря по данным реанализа и наблюдениям на метеостанциях приведены на рис. 4. Падение атмосферного давления в пунктах, ближайших к траекториям тайфунов (Нагасаки, Хамада, Пусан, Владивосток), сопровождалось резким увеличением скорости ветра. В северной части Японского моря (Рудная Пристань) атмосферное давление не опускалось ниже 1000 гПа, а максимальная скорость ветра не превышала 54 км/ч (15 м/с) по данным реанализа и 25 км/ч (7 м/с) по данным наблюдений на метеостанции. Таким образом, экстремальное понижение атмосферного давления наблюдалось при прохождении тайфуна в районе Корейского пролива, а при приближении к побережью Приморского края тайфун быстро терял свою силу. При этом скорость ветра на побережье Приморья (Владивосток) была сравнима со скоростью, наблюдавшейся при прохождении тайфунами района Корейского пролива, до 90 км/ч (25 м/с). Следует обратить внимание на высокие фоновые значения скорости ветра в Пусане и Владивостоке, до 47 км/ч (13 м/с) и 61 км/ч (17 м/с) соответственно. В Рудной Приistani и Преображении фоновые значения скорости вет-

ра, оцененные по реанализу, даже превышали наблюдаемые скорости ветра при прохождении тайфунов.

В настоящем исследовании для анализа метеорологической ситуации были использованы как данные наблюдений на метеостанциях, так и данные атмосферного реанализа ERA5 (рис. 4). Это позволило статистически оценить качество реанализа атмосферного давления и скорости ветра в период прохождения экстремальных тропических циклонов в районе Японского моря (табл. 2). Изменения атмосферного давления имеют очень близкие значения по двум массивам данных, среднеквадратическая ошибка (σ) варьировалась от 0.6 до 3 гПа, а коэффициент корреляции R менялся от 0.94 до 0.997.

Скорости ветра по данным метеостанций и реанализа значительно различались в некоторых пунктах. Так, во Владивостоке и Пусане (кроме случая Майсака) скорость ветра во время прохождения тайфунов по данным реанализа занижена по сравнению с данными метеостанций, хотя характер фоновых изменений скорости ветра и его значения в целом близки ($\sigma = 2.3-3.8$ м/с, $R = 0.64-0.86$). В Рудной Приistani и Преображении данные реанализа существенно отличаются от данных метеостанций как во время прохождения тайфуна, так и в другие дни: скорость ветра в

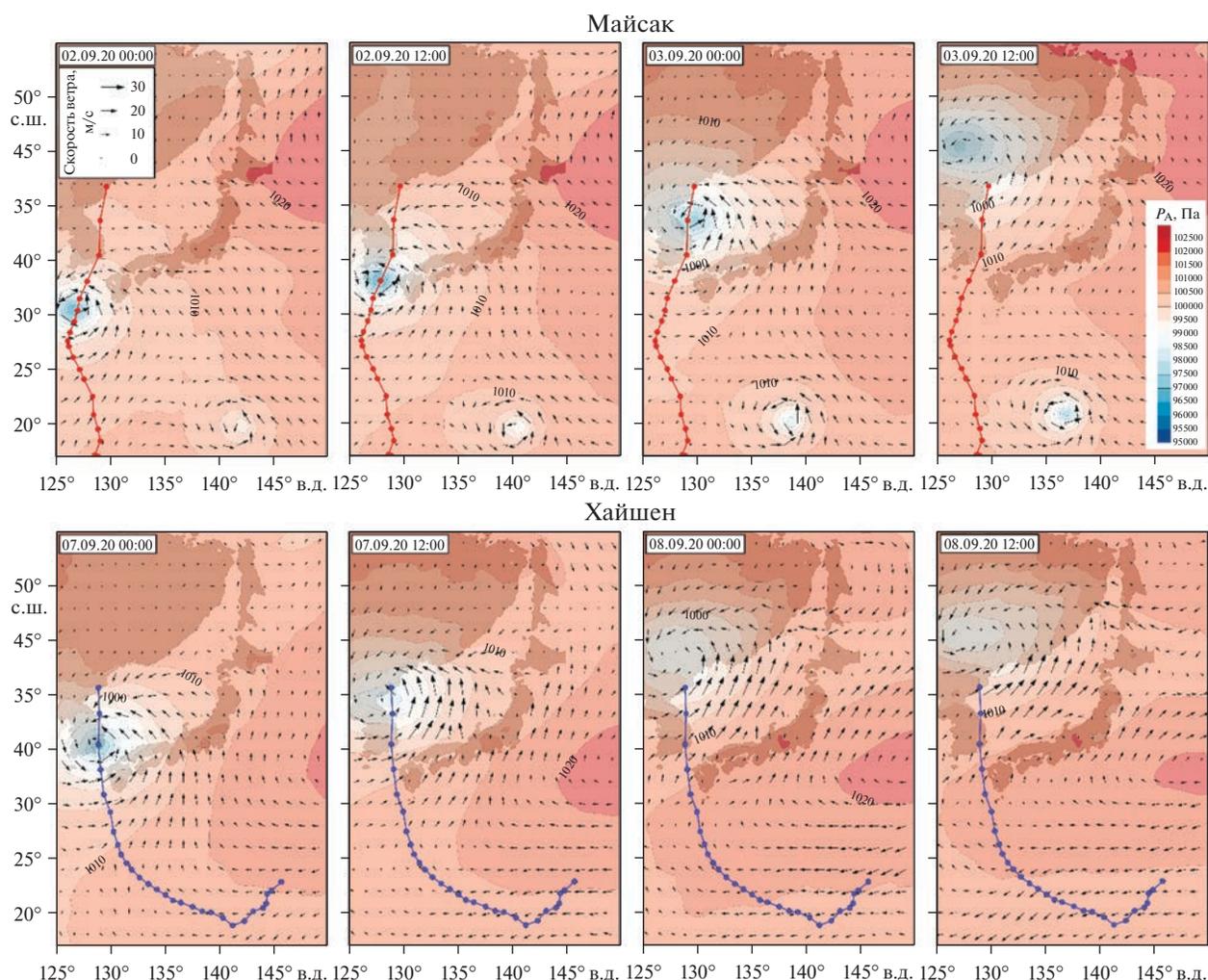


Рис. 3. Траектории тайфунов Майсак с 2 по 3 сентября 2020 г. (верхний ряд) и Хайшен с 7 по 8 сентября (нижний ряд) в полях атмосферного давления (цветной фон, гПа) и скоростей ветра (стрелки, м/с).

данных реанализа в 2–3 раза выше, чем по наблюдениям на метеостанциях, σ достигает 5.8–6.4 м/с, а R снижается до 0.34–0.57 (таблица 2). В Нагасаки кривые изменения атмосферного давления по данным реанализа и метеостанций имеют схожий характер, но в период прохождения тайфу-

нов скорость ветра по реанализу в 2–2.5 раза больше. Видимо, это сильно связано с местной орографией – экранированием соответствующих метеостанций от определенных направлений ветра. Для Хамады наблюдается хорошее соответствие данных реанализа и метеостанции.

Таблица 2. Среднеквадратическая ошибка (σ) и коэффициент корреляции (R), рассчитанные для рядов скорости ветра и атмосферного давления для некоторых пунктов

Пункт	Давление		Скорость ветра	
	σ , гПа	R	σ , м/с	R
Пусан	2.94	0.94	3.75	0.64
Хамада	0.61	0.99	2.47	0.78
Нагасаки	2.15	0.95	5.34	0.75
Преображение	0.81	1.00	5.79	0.57
Рудная Пристань	0.85	1.00	6.42	0.34
Владивосток	0.55	1.00	2.26	0.86

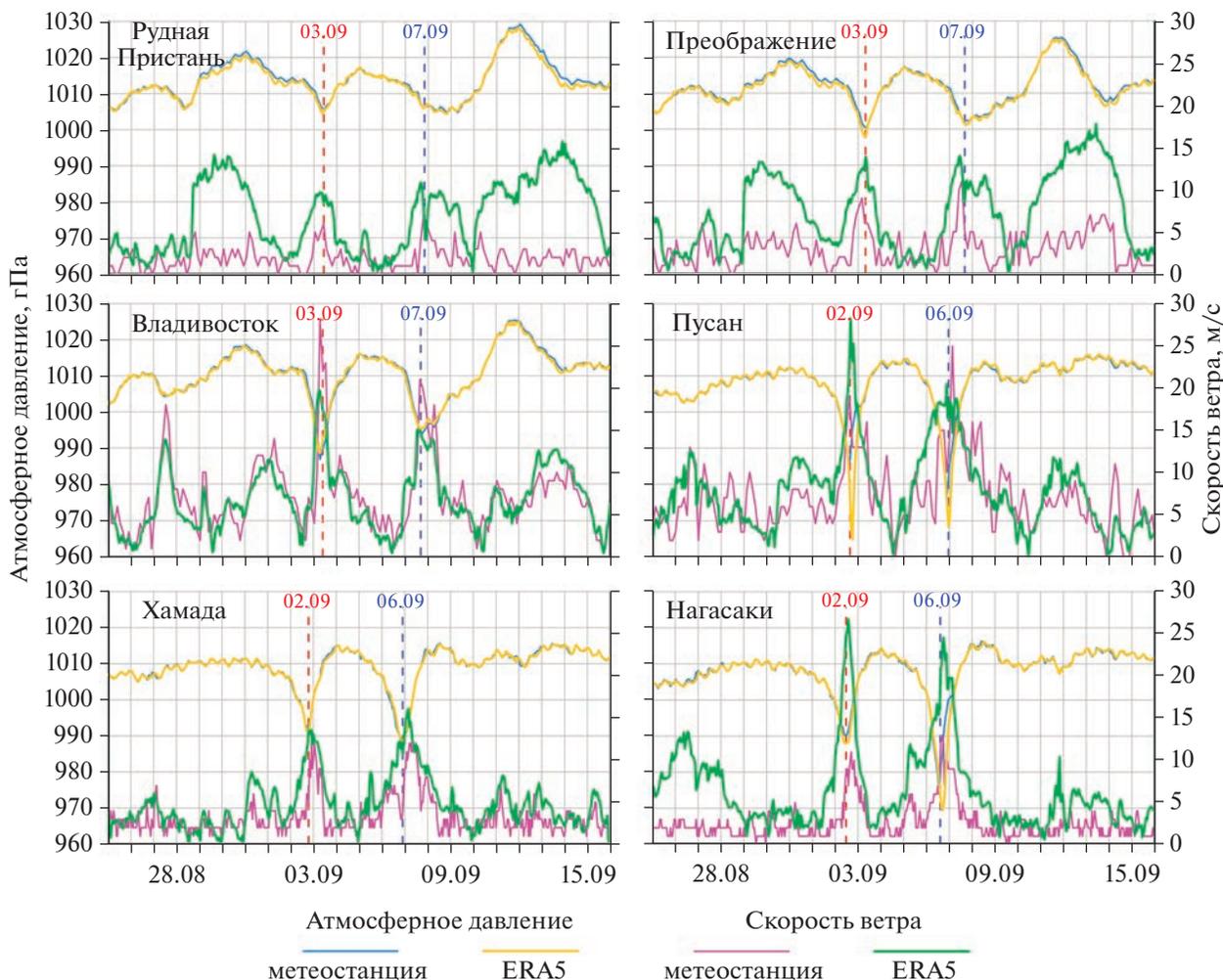


Рис. 4. Атмосферное давление и скорость ветра по данным метеостанций и по результатам реанализа ERA5 (легенда приведена под графиками). Красные и синие вертикальные штриховые линии отмечают время максимального воздействия тайфунов на метеорологические параметры в рассматриваемых пунктах.

4. АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА УРОВНЕМ МОРЯ

Под влиянием тайфунов Майсак и Хайшен в прибрежных районах Японского моря сформировались экстремальные колебания уровня моря. Они представляют собой результат взаимодействия динамических процессов прибрежной зоны, имеющих различные временные и пространственные масштабы. В текущем разделе представлены результаты анализа аномальных особенностей отдельных составляющих колебаний уровня Японского моря, вызванных прохождением этих тайфунов.

На первом этапе анализа из исходных временных рядов была вычтена приливная составляющая. Приливы в Японском море сравнительно невелики и имеют преимущественно неправильный суточный характер. Лишь на севере и на юге, в Татарском и Корейском проливах соответствен-

но, наблюдается значительное усиление приливов и их характер становится близок к правильно-полусуточному. В Татарском проливе величина приливных колебаний превышает 2.5 м, в Корейском проливе она составляет около 3 м, а в центральных районах побережья Японского моря не превышает 0.5 м. На рассматриваемых в рамках текущего исследования станциях максимальный размах приливных колебаний уровня моря был отмечен в Нагасаки (218 см), а минимальный – в Сосуново (8 см).

Непериодические колебания уровня моря, которые остаются в записях после исключения приливной компоненты, имеют преимущественно метеорологическое происхождение. Суммарная высота остаточных колебаний уровня моря (далее *суммарная высота нагона*), сформированных под воздействием тайфунов, менялась от 20 см в северной части моря (Сосуново, Советская Гавань) до 80 см во Владивостоке и Посьете (табл. 3).

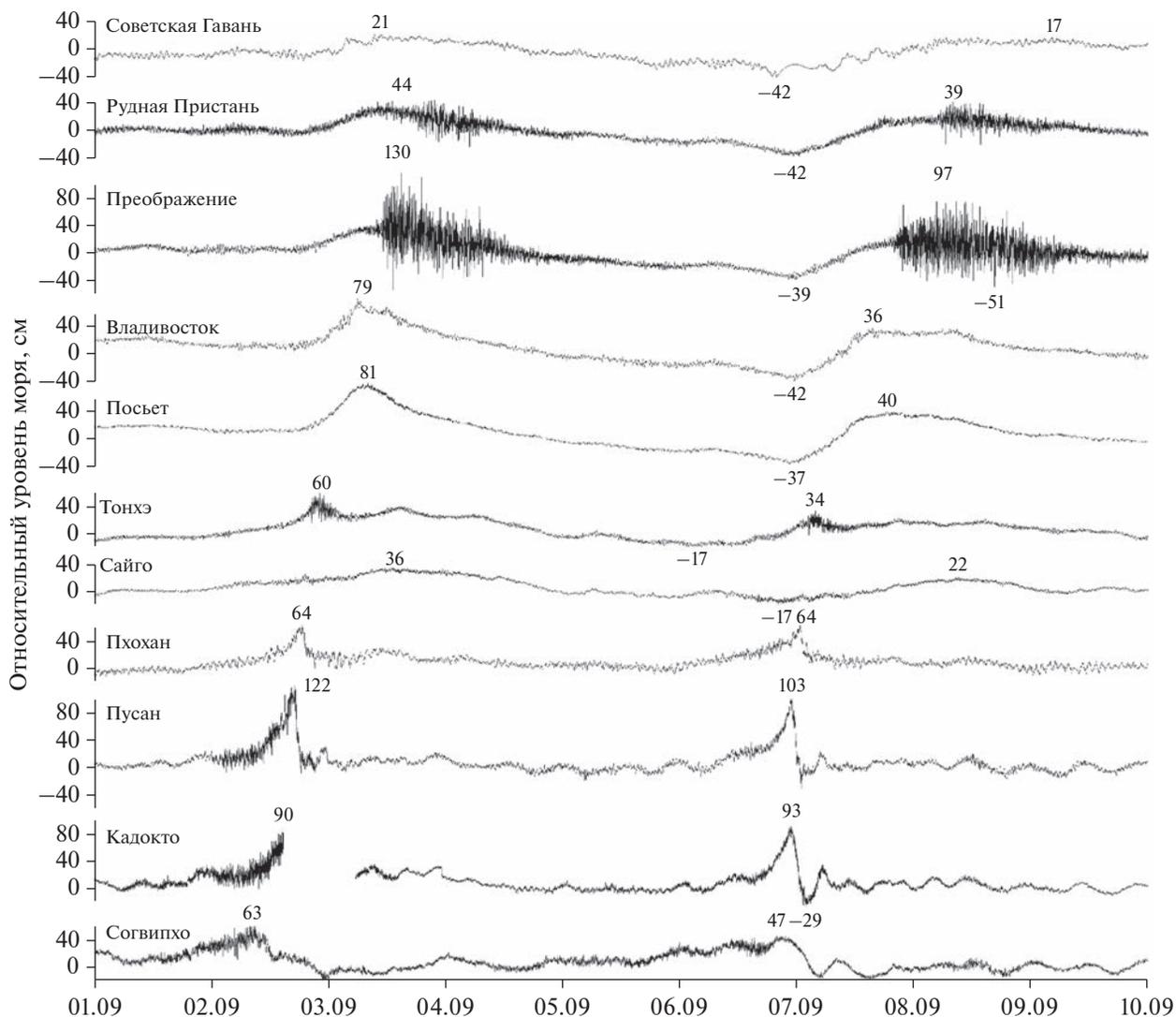


Рис. 5. Непериодические колебания уровня моря, цифрами подписаны максимальные и минимальные значения уровня моря (см) относительно СУМ в сентябре 2020 г.

В отдельных пунктах побережья Японского моря были зафиксированы anomalously высокие отметки уровня моря: до 122 см в Пусане, 124 см в Коджедо и 130 см в Преображении при прохождении Майсака; до 103 см в Пусане, 87 см в Коджедо и 97 см в Преображении при прохождении Хайшена (рис. 5). Именно эти колебания уровня моря приводят к наводнениям, негативные последствия которых увеличиваются в случае совпадения пика нагона с полной водой прилива.

Часто для определения непериодических колебаний уровня моря используют термины “штормовой нагон” (“сгон”) или “сгонно-нагонные явления”. Однако следует обратить внимание, что изменения атмосферного давления и ветрового напряжения создают широкий спектр различных видов непериодических колебаний уровня моря, имеющих собственные особенности. На рис. 5

видно, что в ряде пунктов, где были зафиксированы максимальные суммарные высоты нагона (например, Пусан, Коджедо и Преображение), экстремумы достигались за счет суперпозиции медленных низкочастотных и быстрых высокочастотных колебаний уровня моря. НЧ колебания сформированы в основном штормовыми нагонами с периодами несколько десятков часов. ВЧ колебания включают в себя собственные колебания бухт и заливов (сейши) с периодами от нескольких минут до нескольких часов и инфрагравитационные волны (ИГ-волны) с доминирующими периодами от 30 до 300 секунд [5] (см. рис. 2). Именно взаимодействие этих двух основных составляющих привело к экстремальным колебаниям уровня Японского моря. Следует обратить внимание, что штормовые нагоны — это региональное явление, имеющее пространственные масштабы более

Таблица 3. Высоты нагонов, амплитуды и размах суммарных и непериодических (НЧ и ВЧ) колебаний уровня моря. Прочерки в таблице соответствуют невозможности оценки амплитуды/размаха нагона вследствие отсутствия наблюдений в этот период (см. рис. 6)

Пункт	Непериодические колебания		НЧ (штормовой нагон)		ВЧ (сейши и ИГ-волны)	
	суммарная высота нагона, см	размах, см	высота штормового нагона, см	размах, см	амплитуда, см	размах, см
Тайфун Майсак (01–04.09)						
Советская Гавань	21	39	17	32	8	15
Сосуново	31	44	26	35	9	17
Рудная Пристань	44	78	28	37	29	71
Преображение	130	185	38	47	94	185
Находка	55	65	49	56	6	12
Владивосток	79	86	68	74	12	25
Посъет	81	87	76	80	6	11
Сокчхо	55	68	44	56	12	22
Тонхэ	60	71	40	49	20	41
Улын	39	50	31	40	9	20
Хупхо	70	86	—	—	—	—
Сайго	36	41	33	36	9	17
Пхохан	64	75	49	55	20	39
Пусан	122	134	87	92	51	92
Кадокто	90	97	—	—	—	—
Хамада	67	73	62	65	11	26
Коджедо	124	135	97	100	33	57
Сонсанпо	83	103	62	73	25	42
Согвипхо	63	81	46	56	23	49
Мосыльпо	71	81	36	40	40	66
Нагасаки	68	82	56	63	18	34
Тайфун Хайшен (05–08.09)						
Советская Гавань	17	59	12	48	7	14
Сосуново	23	63	18	54	9	18
Рудная Пристань	39	81	16	52	25	62
Преображение	97	148	18	52	83	145
Находка	25	63	22	57	6	12
Владивосток	36	78	31	67	9	18
Посъет	40	77	37	70	5	9
Сокчхо	34	56	29	47	13	24
Тонхэ	34	51	25	41	15	38
Улын	18	34	14	28	8	14
Хупхо	39	49	27	31	15	40
Сайго	22	39	19	31	7	13
Пхохан	64	72	48	49	21	36
Пусан	103	132	74	81	38	76
Кадокто	93	122	73	83	24	51
Хамада	40	77	35	60	13	29
Коджедо	87	105	69	78	20	38
Сонсанпо	27	48	—	—	—	—
Согвипхо	47	64	42	55	17	31
Мосыльпо	38	57	33	48	10	20
Нагасаки	70	99	60	78	25	46

100 км, тогда как сейши и ИГ-волны – это локальные процессы, имеющие масштаб от 1 до 100 км. Соответственно, свойства этих колебаний существенно зависят от географических особенностей рассматриваемых пунктов наблюдений. С помощью расчета скользящего среднего с окном в 3 ч ряды непериодических колебаний уровня были разделены на низкочастотную и высокочастотную компоненты и детально исследованы по отдельности.

4.1 Штормовой нагон (низкочастотные колебания)

Последовательное прохождение тайфунов Майсак и Хайшен создало в акватории Японского моря сложную картину сгонно-нагонных колебаний уровня моря (рис. 6). Положительную фазу низкочастотных колебаний уровня моря будем называть штормовым нагоном, а максимальное значение уровня моря в этом частотном диапазоне – высотой штормового нагона (рис. 2). По характеру низкочастотных колебаний уровня моря все станции можно разделить на три группы: 1) с плавными и медленными штормовыми нагонами с неявным максимумом – Советская Гавань, Сосуново, Преображение, Находка, Сокчхо, Сайго и Мосильпо; 2) с плавными и медленными нагонами, но хорошо выраженным максимумом – Рудная Пристань, Владивосток, Посьете, Тонхэ, Уллын, Хамада, Согвипхо, Сонсанпо и Нагасаки; 3) с резкими (быстрыми) повышениями/понижениями уровня моря с ярко выраженными максимумами – Пхохан, Пусан, Кадокто и Коджедо.

Максимальные высоты штормового нагона, вызванного тайфуном Майсак, зафиксированы в Коджедо (97 см), Пусане (87 см) и Посьете (76 см). Минимальные значения получены для самых северных пунктов Японского моря: Советская Гавань (17 см), Сосуново (26 см) и Рудная Пристань (28 см). Размах низкочастотных колебаний уровня моря во всех пунктах превышает высоту штормового нагона меньше чем на 10 см, кроме Советской Гавани (15 см). Распределение значений размаха совпадает с распределением значений высоты штормового нагона по пунктам.

Похожая ситуация наблюдается для тайфуна Хайшен. Здесь максимальные значения уровня моря приходятся на те же самые станции на юго-востоке Корейского полуострова: Пусан (74 см), Кадокто (73 см) и Коджедо (69 см). Минимальные значения высоты штормового нагона, 12–18 см, наблюдались также в северной части Японского моря (Советская Гавань, Рудная Пристань, Сосуново и Преображение). На станциях, расположенных вблизи входа в Корейский пролив или непосредственно в нем (Нагасаки, Мосильпо, Согвипхо, Коджедо, Кадокто, Пусан, Пхохан, Хупхо), между двумя пиками нагона не наблюда-

лось значительных понижений уровня ниже СУМ (0 см на рис. 6). Однако на станциях, расположенных внутри Японского моря (все российские станции, а также Сокчхо, Тонхэ, Уллын, Сайго и Хамада), перед вторым нагоном наблюдался сгон. Причем в пунктах, близких к Корейскому проливу (Сокчхо, Тонхэ, Уллын, Сайго и Хамада), значения сгона меняются от –12 см (Сайго) до –25 см (Хамада), тогда как на российских станциях – с –33 до –36 см. Видимо, это понижение уровня связано с откликом Японского моря на пространственную структуру барических полей атмосферы.

На российском побережье Японского моря абсолютная оценка высоты штормового нагона, вызванного тайфуном Хайшен, из-за предшествующего сгона не дает полной картины наблюдавшегося явления. Если оценивать не высоту штормового нагона относительно СУМ (0 см), а размах низкочастотных колебаний, рассчитанный от низших значений уровня моря при сгоне до максимума штормового нагона (см. рис. 2), то пространственная картина распределения экстремальных низкочастотных колебаний уровня меняется. Так, размах низкочастотных колебаний в период Хайшена в Сосуново, Рудной Пристань, Преображении и Находке возрастает до 52–57 см, а во Владивостоке и Посьете – до 67–70 см (см. табл. 3).

4.2 Сейши и инфрагравитационные волны (высокочастотные колебания)

Высокочастотные колебания, выделенные в рамках настоящего анализа, включают в себя сейши и инфрагравитационные волны, проявляющиеся в прибрежной зоне в виде приборных биений [19]. Сейши наблюдались во всех пунктах, но их амплитуды (максимальные значения уровня относительно среднего уровня ВЧ колебаний, см. рис. 2) не превышали 20 см. Вклад этих колебаний на некоторых станциях невелик по сравнению с инфрагравитационными волнами, которые возникают в открытом океане и прибрежной зоне в результате нелинейного взаимодействия ветровых волн; особенно интенсивно ИГ-волны образуются во время сильных штормов [5, 20]. Наиболее сильные приборные биения наблюдаются в Преображении, где размах высокочастотных колебаний уровня моря при прохождении тайфуна Майсак достигал 2 м (рис. 6). Прибойные биения были зафиксированы также в Сосуново, Рудной Пристань и на всех корейских станциях, кроме станции Пхохан.

Максимальная амплитуда ВЧ колебаний при прохождении первого тайфуна была зафиксирована в Преображении, 94 см. В Пусане амплитуда ВЧ колебаний в два раза меньше, до 50 см, в Мосильпо – до 40 см. Тайфун Хайшен вызвал ВЧ ко-

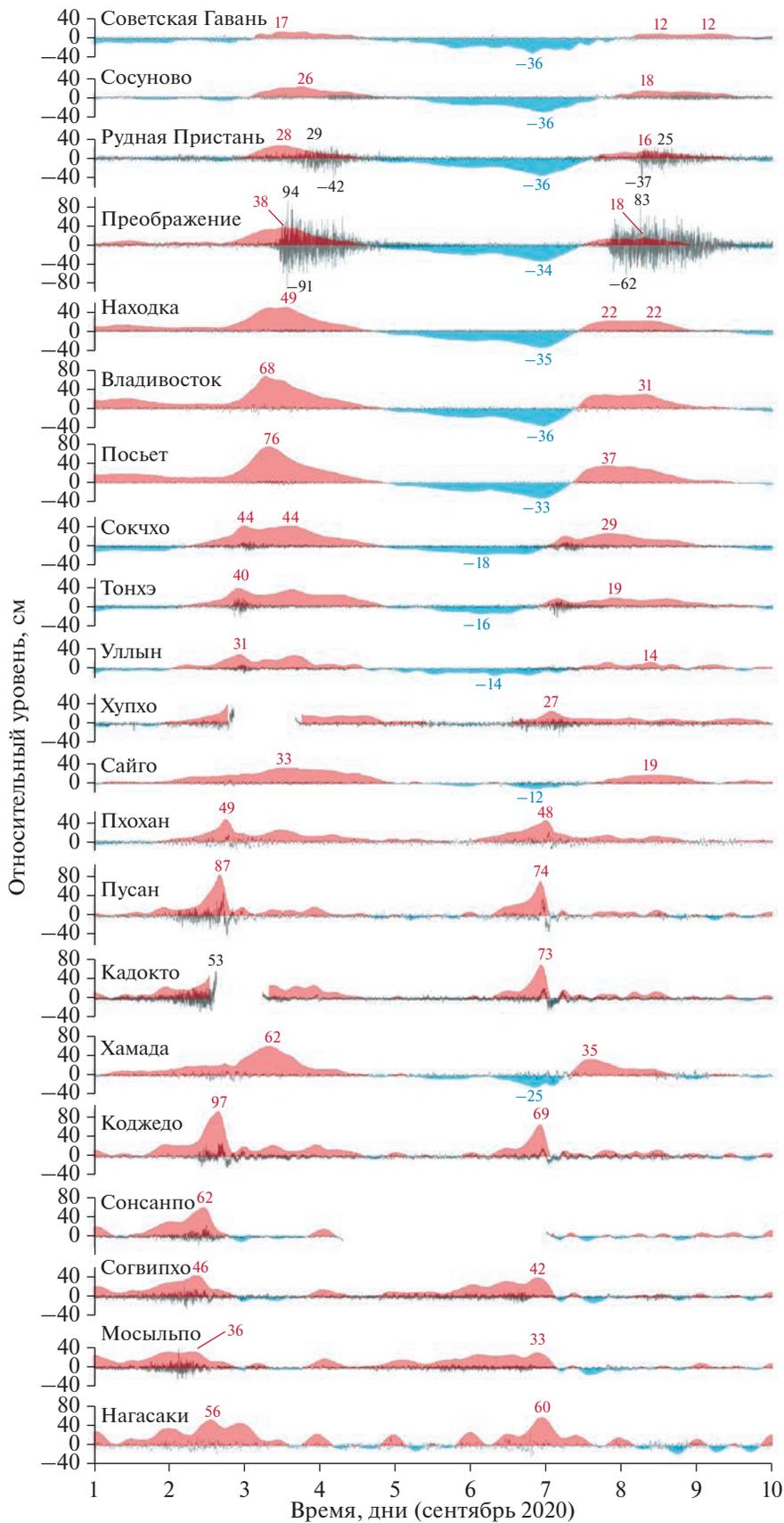


Рис. 6. НЧ (закрашенные области) и ВЧ (серые линии) колебания уровня моря, цифрами подписаны максимальные и минимальные значения низкочастотных колебаний уровня моря (см) относительно СУМ в сентябре 2020 г.

лебания меньшей амплитуды: в Преображении – 83 см, Пусане – 38 см, Рудной Пристани – 25 см, Кадокто – 24 см, Нагасаки – 25 см. Во многих пунктах побережья Японского моря (например, Советская Гавань, Сосуново, Находка, Посьет, Владивосток, Сокчхо, Хамада, Сайго и Уллын) амплитуда ВЧ колебаний для обоих тайфунов не превышала 9–13 см (см. таблицу 3).

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Область между Филиппинскими и Марианскими островами – один из трех активных районов (бассейнов) возникновения сильных тропических циклонов в северной части Тихого океана [2]. Ежегодно несколько десятков тайфунов, образовавшихся в этой области океана, перемещаются над акваторией Филиппинского моря в направлении на север/северо-запад и заходят в Восточно-Китайское море. Некоторые из них распространяются далее в Японское море. Так, в конце августа 2020 г. акваторию Восточно-Китайского моря в направлении с юга на север пересекал тайфун 3-й категории Бави. Скорость ветра внутри тайфуна достигала 185 км/ч (51 м/с), а атмосферное давление в его центре понизилось до 950 гПа. 25 августа тайфун приблизился к Корейскому полуострову, где причинил существенный ущерб экономике региона и привел к гибели одного человека на о. Чеджу (Южная Корея). Но в акваторию Японского моря этот тайфун не зашел, а направился на север над акваторией Желтого моря к западу от Корейского полуострова.

Дуплет тайфунов, наблюдавшийся в Японском море в начале сентября 2020 г. – событие крайне редкое. Особенно если учитывать их высокую категорию и практически полное повторение траекторий на участке к северу от Корейского пролива. Представленный анализ временных рядов в разных частях Японского моря позволил выделить как общие для двух событий особенности, характерные для каждого отдельного пункта, связанные с его географическим положением и топографией прибрежной зоны, так и индивидуальный вклад каждого циклона в формирование и развитие аномалий колебаний уровня моря (рис. 6). При прохождении быстро перемещающегося вихря ветер играет ключевую роль в формировании штормового нагона. В связи с этим даже незначительная разница в скорости ветра, его продолжительности и направлении вызывает заметные различия в характере колебаний уровня моря. В первую очередь это проявляется при сравнении длительности нагонов на станциях в центральной части моря (Посьет, Владивосток, Находка, Преображение, Рудная Пристань). Штормовой нагон, сформировавшийся под влиянием тайфуна Майсак, имел меньшую продолжительность по сравнению со следующим, вызванным Хайше-

ном. Отсутствие четко выраженного максимума второго нагона связано также с преобладающим направлением ветра в тот момент, когда центры циклонов находились к северо-востоку от Корейского полуострова. 3 сентября в 00:00 (UTC) над российским побережьем в районе Посьета, Владивостока, Находки и Преображения преобладал восточный ветер, а 7 сентября в 12:00 (UTC), когда второй тайфун находился примерно в том же месте, что и первый, ветер был юго-восточным, менее благоприятным для формирования нагона (рис. 3).

Более сильный над океаном тайфун Хайшен к моменту его проникновения в акваторию Японского моря был уже слабее, чем Майсак. Об этом говорят значения атмосферного давления и высоты вызванных им штормовых нагонов. На всем побережье моря и в Корейском проливе, кроме Пхохана и пунктов на о. Чеджу, максимальные относительные значения первого штормового нагона были выше, чем для второго. Вероятно, на это мог повлиять образовавшийся после Майсака на западном побережье Японского моря сгон до –36 см (Советская Гавань, Сосуново, Рудная Пристань). В таком случае часть энергии тайфуна могла уйти на подъем уровня моря до среднего уровня (0 см), а после этого остаток вызвал увеличение уровня относительно среднего.

При оценках степени опасности затопления прибрежных территорий важны отметки суммарной высоты нагона – морских наводнений, вызванных прохождением тайфунов (табл. 3, рис. 5). На рис. 7 показано пространственное распределение размаха суммарных неперидических колебаний уровня моря и вклада НЧ и ВЧ составляющих в их формирование. В некоторых пунктах во время обоих событий наибольший вклад вносил штормовой нагон. К ним относятся Советская Гавань, Сосуново, Находка, Владивосток, Посьет и Сокчхо. Однако в Преображении и Рудной Пристани явно преобладают ВЧ колебания уровня моря. На остальных станциях влияние НЧ и ВЧ составляющих приблизительно совпадает. В целом результаты нашего анализа подтверждают выводы работ [11, 17] о существенной роли ВЧ колебаний в формировании наводнений при прохождении сильных атмосферных возмущений. Следует также учитывать, что именно ВЧ колебания вызывают сильные, часто разрушительные, течения во внутренних акваториях (портах и бухтах) [11].

Важную роль в усилении колебаний уровня моря играли частотно-избирательные свойства отдельных акваторий или их частей (бухт, заливов и примыкающего шельфа). Так, ярко выраженные сейши (собственные колебания соответствующей акватории) ранее были обнаружены в бухте Посьета (периоды 30 и 17 мин), заливе Петра Ве-

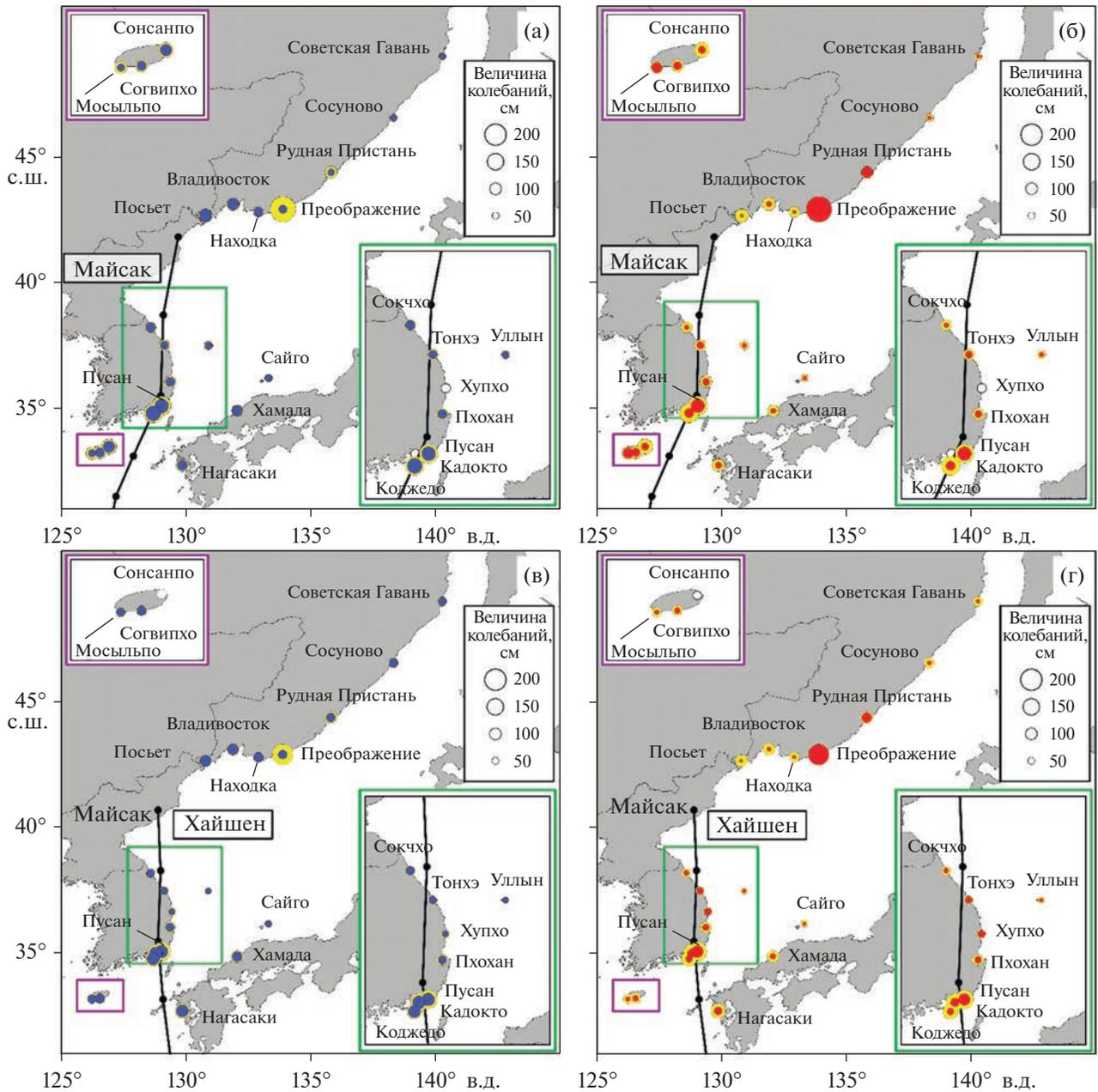


Рис. 7. Размах суммарных неперiodических (желтые кружки), низко- (синие кружки) и высокочастотных (красные кружки) колебаний уровня моря во время прохождения тайфунов Майсак, с 1 по 4 сентября (а, б), и Хайшен, с 5 по 8 сентября (в, г). Диаметр круга пропорционален размаху соответствующих колебаний уровня моря (см. табл. 3). Черными линиями показаны траектории движения тайфунов.

ликого (39 мин), заливе Находка (36 мин), бухте Хамада (17 мин), заливе Нагасаки (37 и 21 мин) и др. [7, 8, 17, 21]. При прохождении тайфунов возникла резонансная раскачка собственных колебаний этих бухт и заливов, что привело к увеличению относительной энергии ВЧ колебаний уровня моря.

На юго-западном побережье Японии периодически наблюдаются катастрофические метеоцинами, известные под местным названием “аби-

ки” [13]. В порту Нагасаки высоты этих волн могут превышать 4.5 м [18]. Возникновение этих колебаний обусловлено подходом к побережью Японии длинных волн, вызванных атмосферными процессами в Восточно-Китайском море и усиленных резонансом Праудмена, связанным с совпадением скоростей атмосферного возмущения и образованных им длинных волн в этом море [18]. Значительное возрастание высот подходящих волн происходит на западном шельфе о. Кюсю

(Япония), а их дальнейшее усиление – в некоторых бухтах этого острова при резонансе собственных частот колебаний данных бухты и частот барических возмущений (“бухтовый” резонанс, см., например, [20]). В период прохождения тайфунов Майсак и Хайшен это явление не наблюдалось, т.к. атмосферные возмущения распространялись в противоположном направлении и отсутствовали резонансные условия, в первую очередь для резонанса Праудмена, но в порту Нагасаки были зарегистрированы заметные сейшевые колебания.

Важную роль в формировании экстремальных значений уровня в отдельных прибрежных пунктах играли инфрагравитационные волны. Основным источником формирования этих волн – ветровые волны и их нелинейное взаимодействие друг с другом [5, 19]. Известно, что тайфуны Майсак и Хайшен вызвали штормовые волны, значительная высота H_s которых достигала 8–9 м [22]. Вероятно, эти штормовые волны стали причиной возникновения аномально сильных инфрагравитационных волн на станциях Преображение и Рудная Пристань и существенно увеличили размах суммарных колебаний уровня моря. ИГ-волны также внесли важный вклад в формирование экстремальных значений уровня моря на станциях в Корейском проливе (Кадокто, Пусане и Коджедо).

Известно, что высокочастотные колебания уровня и, в частности, ИГ-волны вызывают специфические локальные явления: тягун, разрывные течения и пр. [5, 17]. *Тягун* – это периодические горизонтальные движения воды, наблюдаемые во многих гаванях по всему миру, которые вызывают сильные движения и столкновения судов, обрывы якорных тросов и швартовых концов. Одним из основных факторов генерации этого явления являются сильные ИГ-волны, проникающие в гавань. *Разрывные течения* – это интенсивные узкие потоки воды, направленные от суши в море, образование которых тоже тесно связано с ИГ-волнами [16]. Во время сильных тайфунов и ураганов скорость разрывных течений может достигать 10 узлов (5 м/с). Инфрагравитационные волны также являются важным рельефообразующим фактором. Они влияют на формирование ритмических форм рельефа (фестоны, серповидные бары и др.) и могут влиять на потоки прибрежных наносов и их аккумуляцию [5].

С учетом вышеизложенных особенностей колебаний уровня моря в разных частотных диапазонах и географического положения мареографов можно выделить несколько групп анализируемых пунктов по характеру изменения уровня моря во время прохождения тайфунов. Тайфуны Майсак и Хайшен имели примерно одинаковые характеристики, однако над Японским морем первый

циклон был сильнее; поэтому нами были рассмотрены колебания уровня моря, вызванные только тайфуном Майсак. В основе разделения лежит характер штормовых нагонов, сейш и ИГ-волн (рис. 6). К первой группе относятся две самые северные станции: Советская Гавань и Соуново. Они расположены дальше всех от тайфуна, поэтому штормовые нагоны на этой части побережья имели малые высоты, без четкого максимума. Вторая группа включает в себя остальные российские станции в центральной части моря: Рудная Пристань, Преображение, Находка, Владивосток и Посьет. Они отличаются относительно плавным (длительностью около 12 ч) подъемом уровня и таким же плавным его падением. Вариации могут быть связаны с топографией прибрежной зоны пунктов и со степенью их защищенности от волн открытого моря. В Рудной Пристань и в Преображении зафиксированы экстремальные ИГ-волны с амплитудой до 1 м, что выделяет эти станции среди других. В третью группу входят станции южной части моря: Сокчхо, Тонхэ, Уллын, Хупхо и Сайго. Нагоны в этих пунктах характеризуются несколькими максимумами и небольшими ИГ-волнами с амплитудой менее 20 см. Четвертая группа состоит из станций на юго-востоке Корейского полуострова: Пхохан, Пусан, Кадокто и Коджедо. Характер колебаний в них значительно отличается от всех остальных станций. Нагон на этих станциях формируется очень быстро: уровень моря здесь резко возрастает до 1 м за несколько часов, а потом падает еще быстрее. Вероятно, это связано со значительными скоростями ветра на периферии тайфуна, еще не успевшего ослабеть, и особенностями береговой линии Корейского полуострова. Размах высокочастотных колебаний уровня во всех пунктах этой группы, кроме Пхохана, достигает 40 см и более. К последней, пятой, группе относятся пункты на о. Чеджу: Сонсанпо, Согвиохо и Мосьельпо. С востока на запад максимум штормового нагона становится не таким четким из-за удаления пунктов от траектории тайфуна. Амплитуда ИГ-волн на о. Чеджу составляет около 20 см. Станции Хамада и Нагасаки сложно отнести к одной из вышеперечисленных групп. В Нагасаки четко прослеживаются периодические НЧ колебания уровня моря, вероятно, связанные с остаточным приливом, а нагон в Хамаде имеет индивидуальные особенности, отличные от тех, что наблюдаются на других станциях (рис. 6). Таким образом, разделение станций по характеру нагона, вызванного тайфуном 4-й категории, перемещающимся над акваторией Японского моря на север через Корейский пролив, хорошо соотносится с географическим положением станций и их удаленностью от траектории циклона. При этом внутри группы колебания уровня моря различаются в силу влияния изрезанности береговой

линии и топографических особенностей прибрежной зоны и внутренних акваторий (портов), в которых установлены мареографы.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ 1-минутных записей колебаний уровня моря, полученных с помощью береговых мареографов, позволил исследовать особенности прибрежных наводнений, вызванных прохождением двух тайфунов 4-й категории над юго-западной частью Японского моря. Несмотря на то, что тайфун Хайшен по своим характеристикам превосходил тайфун Майсак, он подошел к Корейскому проливу более слабым, поэтому в большинстве рассматриваемых пунктов его воздействие на уровень моря было меньшим.

Под воздействием тайфунов в некоторых прибрежных пунктах возникли значительные штормовые нагоны с высотой 70–90 см. В отдельных пунктах наблюдений (Преображение, Пусан, Коджедо), кроме штормовых нагонов, тайфуны сгенерировали аномально сильные высокочастотные колебания уровня моря (сейши и инфрагравитационные волны), которые привели к экстремальным наводнениям с высотами более 120–130 см и размахом колебаний до 185 см. Для станций внутри Японского моря после прохождения тайфуна Майсак наблюдался сильный сгон, до –36 см, который уменьшил абсолютные оценки высоты последующего штормового нагона, вызванного тайфуном Хайшен.

В представленном исследовании были выявлены как общие особенности отклика колебаний уровня моря на прохождение циклонов, так и индивидуальные свойства, обусловленные конкретными параметрами распространявшихся вихрей и конкретными особенностями пунктов наблюдений. Так, тайфун Хайшен вызвал в центральной части моря более слабый, но и более продолжительный нагон по сравнению с Майсаком. Для этого региона различия между тайфунами (т.е. вынуждающего фактора) оказались сильнее, чем влияние идентичных топографических особенностей (определяющих характер отклика на внешнее возмущение), поэтому характер колебаний уровня моря, вызванных этими двумя тайфунами, в центральной части моря оказался существенно различным.

На основе анализа данных береговых мареографов были выделены пять групп станций с характерными особенностями колебаний уровня моря, вызванных прохождением тайфунов. Полученные результаты хорошо согласуются с географическим положением станций и их расположением относительно траекторий циклонов. В то же время оказалось, что уровень моря сильно зависит от локальных условий пункта наблюдений:

степени закрытости станции от волн открытого моря, места установки самописца уровня моря, изрезанности береговой линии и рельефа дна прилегающей акватории. Таким образом, характер колебаний уровня моря в разных пунктах исследуемого региона в значительной степени индивидуален.

Сравнение записей метеостанций и данных реанализа ERA5 в период прохождения тайфунов позволило оценить качество последнего. Так, атмосферное давление воспроизводится реанализом с достаточно большой точностью, а скорость ветра на разных станциях имеет существенные расхождения, вызванные влиянием локальной орорафии суши.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 08. Японское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Справочник. Проект Моря. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 2003. 397 с.
2. Мамедов Э.С., Павлов Н.И. Тайфуны. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 144 с.
3. Портал РП5: <https://rp5.ru> (Дата обращения: 15.04.2021).
4. Портал NOAA Historical Hurricane Tracks: <https://coast.noaa.gov/hurricanes/#map=4/32/-80> (Дата обращения: 02.12.2020).
5. Рабинович А.Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб: Гидрометеоздат, 1993. 326 с.
6. Российская служба предупреждения о цунами: <http://www.rtw.su/> (Дата обращения: 17.09.2020)
7. Смирнов С.В. О сейшевых колебаниях в заливе Находка // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 78–85.
8. Chupin V., Dolgikh G., Dolgikh S., Smirnov S. Study of free oscillations of bays in the northwestern part of Posyet Bay // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. V. 10. № 8. P. 1005. <https://doi.org/10.3390/jmse10081005>
9. Flanders Marine Institute (VLIZ); Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) (2022): Sea level station monitoring facility: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/map.php> (Дата обращения: 17.09.2020). <https://doi.org/10.14284/482>
10. Ha K.M. Predicting typhoon tracks around Korea // Natural Hazards. 2022. V. 106. P. 1639–1672. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05335-6>
11. Heidarzadeh M., Rabinovich A.B. Combined hazard of typhoon-generated meteorological tsunamis and storm surges along the coast of Japan // Natural Hazards. 2021. V. 106. P. 1639–1672. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04448-0>
12. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. V. 46. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3990>

- rological Society. 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
13. *Hibiya T., Kajiura K.* Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay // *J. Oceanogr. Soc. Japan.* 1982. V. 38. P. 172–182.
 14. *Kim H.J., Kim D.B., Jeong O.J., Moon Y.S.* The moving speed of typhoons of recent years (2018–2020) and changes in total precipitable water vapor around the Korean Peninsula // *Journal of the Korean Earth Science Society.* 2021. V. 42. № 3. P. 264–277. <https://doi.org/10.5467/JKESS.2021.42.3.264>
 15. *Lin L.C., Wu C.H.* Unexpected meteotsunamis prior to Typhoon Wipha and Typhoon Neoguri // *Natural Hazards.* 2021. V. 106. P. 1673–1686. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04313-0>
 16. *MacMahan J.* Low-frequency seiche in a large bay // *J. Phys. Oceanogr.* 2015. V. 45, P. 716–723. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0169.1>
 17. *Medvedev I.P., Rabinovich A.B., Šepić J.* Destructive coastal sea level oscillations generated by Typhoon Maysak in the Sea of Japan in September 2020 // *Scientific Reports.* 2022. V. 12. № 8463. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12189-2>
 18. *Monserrat S., Vilibić I., Rabinovich A.B.* Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band // *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 2006. V. 6. № 6. P. 1035–1051. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-1035-2006>
 19. *Munk W.H.* Surf beats // *EOS, Transactions American Geophysical Union.* 1949. V. 30. № 6. P. 849–854. <https://doi.org/10.1029/TR030i006p00849>
 20. *Rabinovich A.B.* Seiches and harbor oscillations. In: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering* / Ed. Kim. Y.C. Chapter 9. World Scientific Publ., Singapore, 2009. P. 193–236.
 21. *Smirnov S.V., Yaroshchuk I.O., Shvyrev A.N. et al.* Resonant oscillations in the western part of the Peter the Great Gulf in the Sea of Japan // *Natural Hazards.* 2021. V. 106. № 2. P. 1729–1745. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04561-8>
 22. *Yuk J.H., Kang J.S., Myung H.* Applicability study of a global numerical weather prediction model MPAS to storm surges and waves in the south coast of Korea // *Atmosphere.* 2022. V. 13. № 4. P. 591. <https://doi.org/10.3390/atmos13040591>
 23. *Zhu D., Zhi X., Wang N. et al.* Impacts of Changbai Mountain topography on the extreme precipitation from super typhoon Maysak // *Front. Environ. Sci.* V. 9. № 818402. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.818402>

Extreme Sea Level Variations in the Sea of Japan Caused by the Passage of Typhoons Maysak and Haishen in September 2020

D. A. Smirnova^{a, b, #, ##}, I. P. Medvedev^b

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^b*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: dasha@a-smirnov.com*

^{##}*e-mail: moscowdadas@gmail.com*

This study investigates extreme sea level variations recorded by tide gauges in the Sea of Japan during the passages of typhoons Maysak and Haishen in September 2020. Specific focus is on storm surges, seiches and infragravity waves identified in the records using tidal and statistical analyses. At most locations, storm surges, formed through the combined effect of atmospheric pressure changes and strong winds, were the major contributors to the extreme sea level events. For the Russian and Japanese coasts, the first typhoon, Maysak, turned out to have the greatest impact, while for the southeastern coast of the Korean Peninsula, the largest sea level variations were caused by the second typhoon, Haishen. At all sites, the passing storms induced eigen oscillations in the respective bays and harbours. Pronounced high-frequency oscillations with periods of two to seven minutes, which appear to be associated with infragravity waves, were recorded, reaching a maximum range of 2 m at Preobrazheniye. The observed differences in component content and associated characteristics of the observed sea level variations arise from differences in the topographic features of the corresponding coastal sites. Statistical analysis of the atmospheric pressure and wind speed series taken from weather stations and from the ERA5 reanalysis shows that atmospheric pressure is reproduced by reanalysis with high accuracy, whereas wind speed at different stations has significant discrepancies related to differences in orographic features.

Keywords: Sea of Japan, Maysak, Haishen, storm surge, typhoon, seiches