



**Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова**

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**КАФЕДРА ОКЕАНОЛОГИИ**

**СМИРНОВА Дарья Алексеевна**

**Экстремальные колебания уровня Японского моря,  
вызванные в сентябре 2020 г.  
тайфунами Майсак и Хайшен**

**ВЫПУСКНАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Работа допущена к защите  
«  »            20   г.

---

*(подпись)*

Научный руководитель:  
доцент, к.г.н.  
В.С. Архипкин

Научный консультант:  
к.ф-м.н.  
И.П. Медведев

Рецензент:  
н.с., к.г.н.  
Ф.Н. Гиппиус

Москва 2021

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. Основные типы колебаний уровня моря.....</b>	<b>4</b>
1.1 Штормовые нагоны.....	5
1.2 Волновые нагоны .....	6
1.3 Вторичные нагонные колебания.....	6
1.4 Сейши .....	7
1.5 Инфраволновые волны.....	9
<b>Глава 2. Физико-географическое описание района и особенности режима колебания уровня Японского моря.....</b>	<b>13</b>
<b>Глава 3. Данные и методы .....</b>	<b>21</b>
3.1 Описание данных .....	21
3.2 Методы .....	25
3.2.1 Гармонический анализ.....	25
3.2.2 Спектральный анализ.....	26
3.2.3 Статистический анализ.....	27
<b>Глава 4. Особенности приливных колебаний уровня Японского моря .....</b>	<b>30</b>
<b>Глава 5. Статистический анализ колебаний уровня Японского моря .....</b>	<b>33</b>
<b>Глава 6. Непериодические колебания уровня Японского моря, вызванные тайфунами Майсак и Хайшен.....</b>	<b>39</b>
<b>Глава 7. Спектральный анализ непериодических колебаний уровня моря ....</b>	<b>48</b>
<b>Глава 8. Влияние высоты ветровых волн на дисперсию колебаний уровня ....</b>	<b>55</b>
<b>Выводы .....</b>	<b>59</b>
<b>Заключение .....</b>	<b>62</b>
<b>Использованная литература .....</b>	<b>63</b>

## Введение

В начале сентября 2020 г. над южной частью акватории Японского моря прошли тайфуны Майсак и Хайшен. Они привели к масштабным разрушениям как на суше (остановка двух реакторов южнокорейской АЭС, повреждение инфраструктуры городов на побережье, затопление портов), так и на море (вынос на берег северокорейского судна и в открытое море — японского, повреждение плавучего дока во Владивостоке и судов в бухтах). Эти циклоны относились к тайфунам 4 категории со скоростями ветра более 60 м/с. Однако пик их активности пришелся на акваторию вне Японского моря. Если бы на япономорское побережье обрушилась вся мощь тайфунов, последствия были бы еще серьезнее. Наряду с сильным ветром и обильными осадками свой вклад внесли значительные волны, имеющие разный генезис.

Цель этого исследования — выявить характер колебаний уровня моря на русских, японских и корейской станциях. Для ее достижения был выполнен ряд задач: разделение суммарных колебаний на отдельные составляющие (приливы, штормовые нагоны, сейши, инфрагравитационные волны) и оценка их высот; анализ спектрально-частотных свойств колебаний уровня для разных станций; сравнение отклика уровня поверхности Японского моря, вызванного прохождением двух тропических циклонов; количественная и качественная оценка вынуждающей силы, генерирующей инфрагравитационные волны.

Помимо перечисленных волн из-за резонанса собственной частоты колебаний залива и частоты барических возмущений тайфуны могут вызывать в бухтах стоячие колебания высотой несколько метров — метеоцунами, которые в Японии получили название «абики». Это явление известно в Нагасаки. Однако за анализируемые 3.5 месяца ни в одном пункте метеоцунами не наблюдались. Их особенности возникновения при прохождении циклонов исследованы в [1, 2].

Уникальность исследования состоит в том, что на данный момент нет ни одной публикации о реакции уровня поверхности Японского моря на прохождение тайфунов Майсак и Хайшен, хотя работы, посвященные этим циклонам есть, например, их влиянию на пожары в лесах США [3]. Впервые одновременно анализируется такой широкий спектр волн, вызванных сильнейшими тайфунами.

## Глава 1. Основные типы колебаний уровня моря

Основным предметом исследования в данной работе являются непериодические колебания уровня Японского моря, которые получены вычитанием предвычисленных приливов из суммарных колебаний для каждого пункта (рис. 1). Непериодические колебания уровня делятся на отдельные составляющие: ветровые волны (несколько секунд), инфрагравитационные волны (3 – 5 минут), сейши (десятки минут – час), нагоны (до нескольких суток), вторичные нагонные колебания (несколько часов).

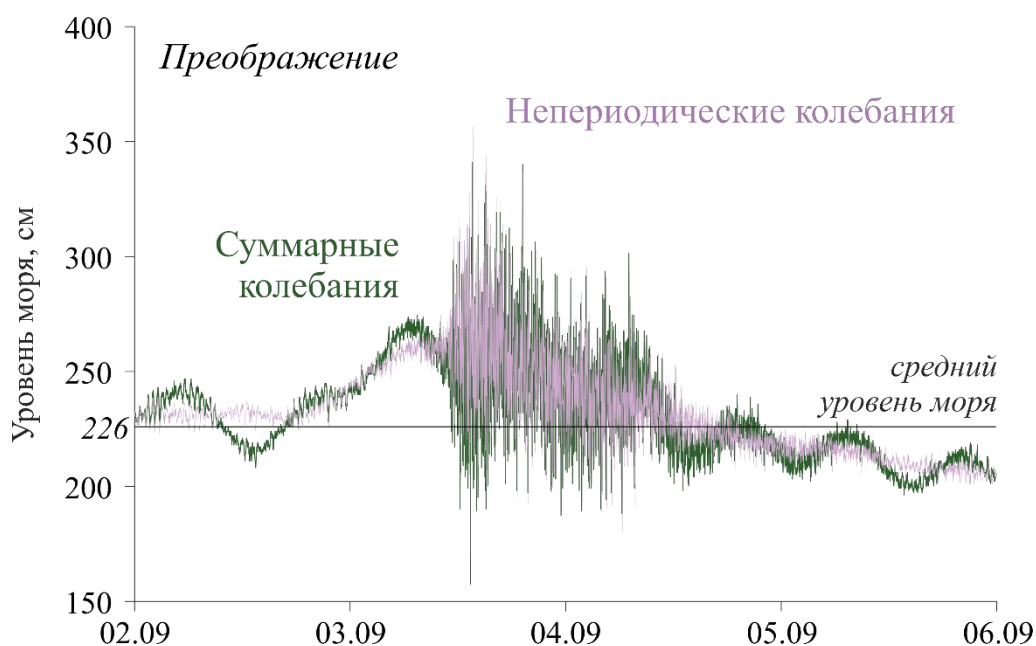


Рис. 1. Суммарные и непериодические колебания уровня моря в Преображении в сентябре 2020 г.

Прохождение циклонов приводит к увеличению энергии низкочастотных волн. В данном исследовании колебания будут проанализированы только в прибрежной зоне — области от уреза воды до глубины десятка метров, где ярко проявляются штормовые и волновые нагоны, разрывные течения, прибойные биения и другие результаты взаимодействия волн. Она состоит из двух областей, разделенных линией обрушения волн: прибойной зоны и внешней прибрежной зоны. Они сильно различаются по преобладающим волнам. Так, во внешней прибрежной зоне преобладают ветровые волны и волны зыби, а в прибойной — энергия больше у длинных волн. Система колебаний уровня моря в прибрежной зоне имеет сложную структуру и зависит от трех основных факторов: атмосферных условий,

морфометрических характеристик бухты или залива и изменений при взаимодействии волн (нелинейные эффекты, резонанс, диссипация, рефракция и т.д.).

## 1.1 Штормовые нагоны

Во время шторма дрейфовые течения и короткие ветровые волны несут в сторону берега большие массы воды, которые не успевают полностью уйти обратно в море и в совокупности с длинными волнами и приливом вызывают подъем среднего уровня у берега. Это явление называется штормовым нагоном. Оно приводит к частому затоплению территорий.

Штормовой нагон — это подъем уровня в прибрежной зоне, имеющий уединенный характер и вызываемый совместным влиянием ветра и атмосферного давления при прохождении циклона. Его можно разложить на отдельные составляющие: ветровой (сильный ветер перемещает воду к берегу, не давая ей уходить, отчего со временем возрастает давление; оно вызывает отток, компенсирующий подъем уровня) и бароградиентный (образованный под воздействием градиентов атмосферного давления) нагоны. Исследования показали, что для средних широт вклад первого компонента намного больше, чем второго [4].

Высота штормовых нагонов зависит от ряда факторов: морфометрии района (особенностей береговой линии и рельефа дна), глубины, характеристик тайфуна (скорости перемещения и траектории). Они могут усиливаться длинными волнами, сформированными циклоном в открытом море. Прилив может как усугубить эффект нагона, так и почти нейтрализовать его. Период штормовых нагонов — от нескольких часов до нескольких суток в зависимости от силы ветра и величины давления в циклоне. Наиболее опасные штормовые нагоны наблюдаются в заливах с широким устьем и резким уменьшением ширины и глубины к его вершине.

Обычно уровень моря опускается, предшествуя нагону. То есть наблюдается обратное явление — сгон. Часто он следует и за нагоном, иными словами, уровень опускается ниже предштормового положения. Это приводит к уменьшению масштаба разрушений от ветровых волн. Фазы сгонно-нагонных колебаний неодинаковы в разных пунктах акватории [4, 5, 6].

## 1.2 Волновые нагоны

Энергия разрушающихся ветровых волн переходит в колебания с более низкой частотой — волновой нагон. Он проявляется в повышении среднего уровня моря на некоторое время. Основной причиной являются шторма, формирующие высокие ветровые волны. После волнового нагона происходит понижение уровня — волновой сгон, по аналогии со штормовым. Период колебаний также составляет от нескольких часов до нескольких суток. Характер нагонов, по предположениям Матушевского, определяется глубиной обрушения волн — максимальные значения достигаются на линии разрушения волн. Как показали исследования, теория Лонге-Хиггинса-Стюарта, о которой речь пойдет ниже, хорошо описывает формирование не только инфрагравитационных волн, но волновых нагонов. Их доля в колебании уровня во время штормов составляет от 10 до 20%. Волновой нагон возникает не только во время бурь. В остальное время его бывает сложно выделить в нагонной составляющей колебания уровня из-за маленькой амплитуды [7].

## 1.3 Вторичные нагонные колебания

В середине XX в. Рэдфилдом и Миллером было обнаружено явление, вызываемое тайфуном — вторичные нагонные колебания. В 1954 г. после урагана Кэррол на побережье США наблюдались колебания уровня высотой около 1 м с периодом 5.5 часов. Они перемещались со скоростью, сопоставимой со скоростью движения вихря. Опасность вторичных нагонных колебаний заключается в том, что они приходят неожиданно, спустя значительное время после нагона, вызванного циклоном. Если «основной» нагон может нивелироваться приливом, то последующие колебания могут быть усилены им и привести к затоплению побережья. Рэдфилд и Миллер выдвинули теорию о резонансе атмосферных и вторичных нагонных колебаний. Однако скорость длинных волн по расчетам значительно превосходит скорость последних. Манк, Снодграсс и Кэрриер предположили связь колебаний с резонансным возбуждением краевых волн. Модель, хотя и имела значительное допущение в виде бесконечно увеличивающейся

глубины по мере удаления от берега, основные физические особенности воспроизводила правильно.

#### 1.4 Сейши

Другие низкочастотные колебания, вызываемые атмосферными и сейсмическими возмущениями, — сейши. Это стоячие колебания, возникающие в заливах или бухтах и определяемые их морфометрией. Изначально изучение сейш было связано с двумя практическими проблемами: оценкой высоты цунами и его последствий и значительными колебаниями в портах, которые наносят ущерб работе флота.

При поперечном разрезе сейши выделяются области, где есть колебания — пучности, и где их нет — узлы (рис. 2). В пространстве узлы представляют собой узловые линии. Для расчета периода стоячих волн используются две формулы. Первая — Мериана — для закрытых бассейнов с одной узловой линией:

$$\tau = \frac{2L}{n\sqrt{gD}},$$

где  $L$  – длина бассейна,  $D$  – его средняя глубина,  $g$  – ускорение свободного падения,  $n = 1, 2, \dots$  – количество мод, которое соответствует шагу поперечных узловых (нодальных) линий. Вторая — для открытых бассейнов, в которых узловая линия не обязательно находится в заливе:

$$\tau = \frac{4L}{(2n + 1)\sqrt{gD}},$$

где  $n = 0, 1, 2, \dots$ . В разных бухтах количество узловых линий варьируется [8]. В полузамкнутых акваториях также существует особый вид собственных колебаний — мода Гельмгольца (нулевая или фундаментальная мода). Ее узловая линия находится на входе в залив, а пучность в вершине залива.

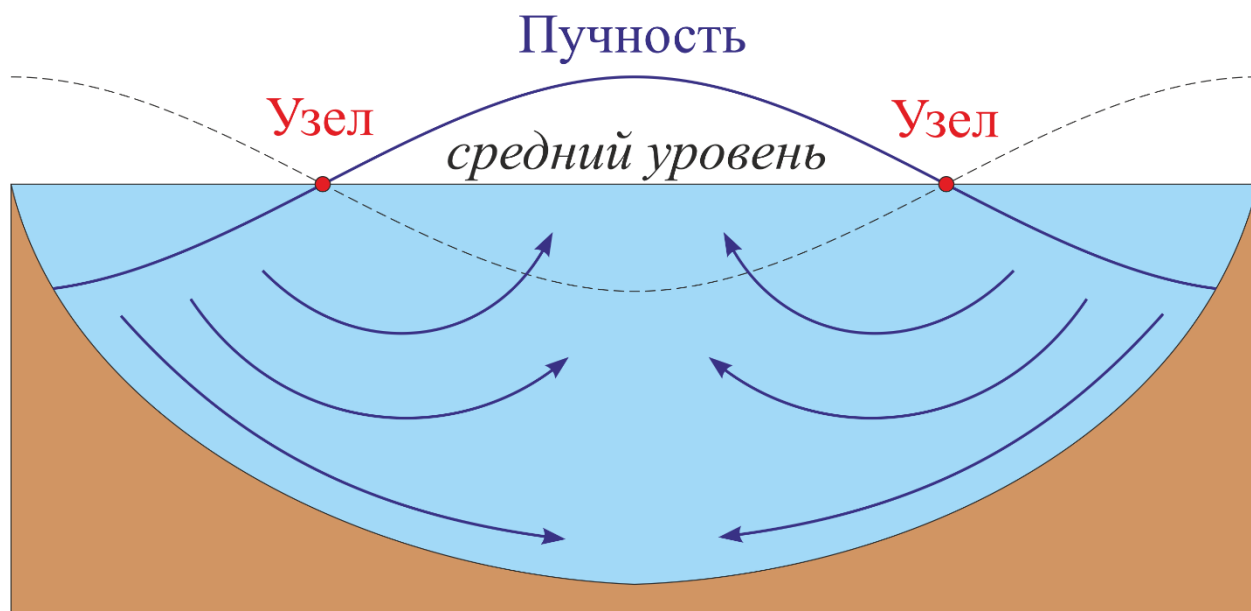


Рис. 2. Поперечный разрез двухузловой сейши

На основе всех данных ученые пришли к выводу, что сейши даже в одном заливе могут иметь разный механизм формирования, например, сейсмические колебания, атмосферные возмущения, приливы, усиление на шельфе волн открытого моря. Тем не менее в крупных бухтах с периодом собственных колебаний 10-20 часов основной источник — шторма и приливы, в средних гаванях (период собственных колебаний от 10 минут до нескольких часов) — атмосферные процессы и цунами, в маленьких акваториях (период собственных колебаний несколько минут) — ветровые волны и зыбь.

Вне зависимости от источника возмущений периоды стоячих колебаний практически не меняются. Это предположение об универсальном (в смысле преобладающих периодов) характере сейш выдвинул Омори [8]. Дальнейшие исследования Хонды [9] подтвердили эту теорию. Иными словами, форма и глубина залива играет решающую роль в структуре этих колебаний. В широких гаванях или мелководных бухтах с узким входом сейши незначительны, тогда как в узких вытянутых заливах и эстуариях они проявляются ярче всего. На основе многолетних исследований было выделено 5 основных групп акваторий по их морфометрическим параметрам: узкие длинные бухты с хорошо выраженным входом (сильные сейши); крупные заливы (слабые сейши); акватории неправильной формы (индивидуальный характер сейш); водоемы с широким открытым входом, часто сложно определяемым



(слабые сейши); островные и открытые берега (сейши, вероятно, имеют другой генезис, в основе которого лежит шельфовый резонанс волн открытого океана).

Сейши часто появляются в одну и ту же фазу приливов. В некоторых бухтах и заливах стоячие колебания, вызванные прохождением барических систем, имеют те же доминирующие периоды, что и обычные фоновые колебания. На япономорском побережье они имеют нерегулярный характер.

## 1.5 Инфрагравитационные волны

Ветровые волны и волны зыби, усиливающиеся во время штормов и прохождения циклонов и не рассматривающиеся в работе из-за разрешения данных, генерируют в открытом море и прибрежной зоне длинные волны с периодом от 30 секунд до нескольких минут. Такие колебания уровня получили название «инфрагравитационные волны». Все ученые сходятся в том, что причина их существования — нелинейное взаимодействие высокочастотной составляющей колебаний. Инфрагравитационные волны порождают волновые нагоны, прибойные биения, разрывные течения, и поэтому исследуются учеными по всему миру. Уникальность этой группы колебаний уровня состоит в том, что, обладая основными свойствами длинных волн, они в то же время тесно связаны с ветровыми волнами и зыбью хорошим соответствием их периодов. Структура инфрагравитационных волн определяется в основном характером и параметрами ветрового волнения, мало зависимо от рельефа дна и морфометрии акватории. Их длина изменяется в диапазоне от нескольких десятков метров до нескольких десятков километров. Сила шторма определяет высоту инфрагравитационных волн, поскольку их амплитуда пропорциональна амплитуде ветровых волн и нелинейное взаимодействие становится более интенсивным.

Механизмы формирования и трансформации инфрагравитационных волн, особенно в прибойной зоне, до сих пор остаются дискуссионным вопросом. Некоторую сложность вносит и тот факт, что изначально эти колебания уровня были названы Манком прибойными биениями, что не соответствует их современному определению. В основе явления лежит энергия, освободившаяся после разрушения ветровых волн в прибойной зоне, которая, отражаясь от береговой линии,

возвращается в океан уже как длинноволновая. Этой же точки зрения придерживался и Таккер, при этом обратив внимание на связь образующихся длинных волн и групповой структуры ветровых волн вне прибойной зоны. Тем временем Йосида обнаружил, что образование инфрагравитационных волн (в то время называющихся еще прибойными биениями) происходит не только у берега, но и в открытом море. Манку же пришлось пересмотреть ранее выдвинутую теорию, потому что по новым данным выяснил, что прибойные биения распространяются в основном в сторону берега, а при движении в обратную сторону их энергия быстро диссипирует.

Независимо от Йосиды Лонге-Хиггинсом и Стюартом была сформулирована теория о генезисе этих волн, которая впоследствии помогла объяснить результаты, ранее полученные Манком, легла в основу других предположений. Ученые ввели термин «радиационное напряжение», означающее избыток потока импульса от поступательного движения ветровых волн. Его воздействие на жидкость и приводит к образованию прибойных биений. Это предположение пересекается с гипотезой Манка об энергии от обрушения ветровых волн — принцип «лишней» энергии. Из теории вытекает и подтверждение возможности образования этих длинных волн в открытом море. Исследования также выявили увеличение влияния радиационного напряжения на жидкость по мере уменьшения средней глубины. Во время дальнейшего изучения данного вида волн стало понятно, что теория требует корректировки для малых глубин.

Таким образом, название, данное Манком, неточно отражало явление длинноволновых колебаний, являющихся результатом взаимодействия ветровых волн, большая часть которых перемещается в сторону берега. Взамен Кинсмен предложил термин «инфрагравитационные волны».

Несмотря на то, что вопрос генерации и трансформации инфрагравитационных волн все еще остается открытым, на данный момент сформировалось определенное представление о взаимодействии волн в прибойной зоне (рис. 3). В открытом море образуются вынужденные инфрагравитационные волны под действием радиационного напряжения. Вместе с ветровыми волнами и зыбью они достигают прибойной зоны (линии обрушения волн), где взаимодействуют друг с другом и с краевыми волнами. В результате отражения от берега в открытое море уходит

длинноволновая энергия, проявляющаяся в свободных излученных инфрагравитационных волн, которые относительно быстро затухают. Немалый вклад в понимание процесса внес Галлахер, развивавший теорию Лонге-Хиггинса-Стюарта. Именно он выяснил, что при соблюдении условий резонанса (определенных углах подхода волн к берегу) возникают свободные краевые волны, иногда с большими амплитудами, часть которых захватывается на мелководье и может существовать достаточно долго, перемещаясь на значительные расстояния. В противном случае возможны только вынужденные колебания. То есть результаты Галлахера говорят о том, что поле инфрагравитационных волн — это суперпозиция вынужденных колебаний, образовавшихся в данном районе, и свободных, сформированных как в этой области, так и на значительном расстоянии от нее. Группа ученых во главе с Симондсом показали, что свободные инфрагравитационные волны могут образоваться не только путем отражения от береговой линии, но и за счет временной изменчивости линии обрушения ветровых волн. Этот же механизм может вызывать и краевые волны, распространяющиеся вдоль берега. Отдельные формы рельефа дна прибрежной зоны, горизонтальный размер которых сравним с длиной пакета ветровых волн, также могут возникать свободные длинные волны, не соответствующие по скорости (обычно 7 – 9 м/с) и направлению образовавшим их вынужденным волнам. Последние более короткие, мало зависят от глубины и намного быстрее затухают при движении в открытое море.

По мере удаления от берега меняется преобладающая составляющая. Так, влияние краевых волн велико в непосредственной близости от береговой линии. Во внешней прибрежной зоне доминируют вынужденные и излученные волны, чья роль увеличивается во время штормов.

При прохождении циклонов и тайфунов энергетический уровень спектра инфрагравитационных волн возрастает на 1 – 2 порядка. Энергетические спектры этого диапазона частот делятся на 3 группы: с одним спектральным максимумом с периодом 1 – 3 минуты (генерируется в основном ветровыми волнами с периодом 6 – 7 секунд), с двумя максимумами различных периодов и «белый шум» без выраженного максимума. Вероятно, к «обелению» приводят процессы в прибойной

зоне (диссипация, резонанс, нелинейное взаимодействие и т.д.). В данном исследовании графики спектральной плотности относятся к третьей группе.

Инфравгравитационные волны вызывают различные явления в прибрежной зоне. Одно из них — прибойные биения – колебания уровня моря в прибойной зоне, сформированные инфравгравитационными волнами. Они имеют достаточно стабильные периоды колебаний, совпадающие с периодами групп ветровых волн. В зависимости от района высоты прибойных биений могут колебаться от 1 до 250 см, а периоды — от 0.3 до 7 минут. Из-за одинаковой вынуждающей силы связь между прибойными биениями и ветровыми волнами достаточно велика. Она проявляется в зависимости высот и периодов. Высоты связывает отношение

$$H_l = a * H_s,$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности, меняющийся от района к району,  $H_l$  – высота прибойных биений,  $H_s$  – высота ветровых волн и зыби. На отношение между периодами первым обратил внимание Бычков:

$$T_l = 5T_s + 20,$$

где  $T_l$  – период прибойных биений,  $T_s$  – период ветровых волн и зыби. В свою очередь между высотой и периодом прибойных биений зависимость обратно пропорциональная [8].

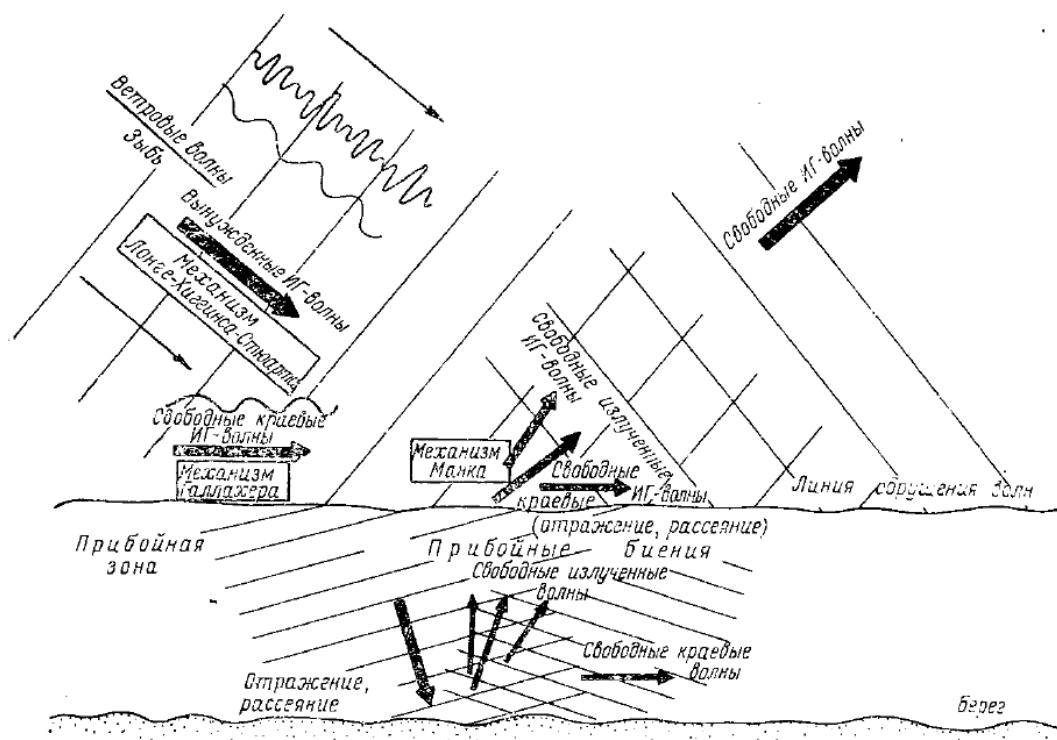


Рис. 3. Схема генерации инфравгравитационных волн в прибрежной зоне океана [8]

## Глава 2. Физико-географическое описание района и особенности режима колебания уровня Японского моря

Японское море — самое южное из трех дальневосточных морей России. К нему выходят также КНДР, Республика Корея и Япония. Море вытянуто с юго-запада на северо-восток. На востоке омывает острова Сахалин, Хоккайдо, Хонсю и Кюсю (рис. 4).

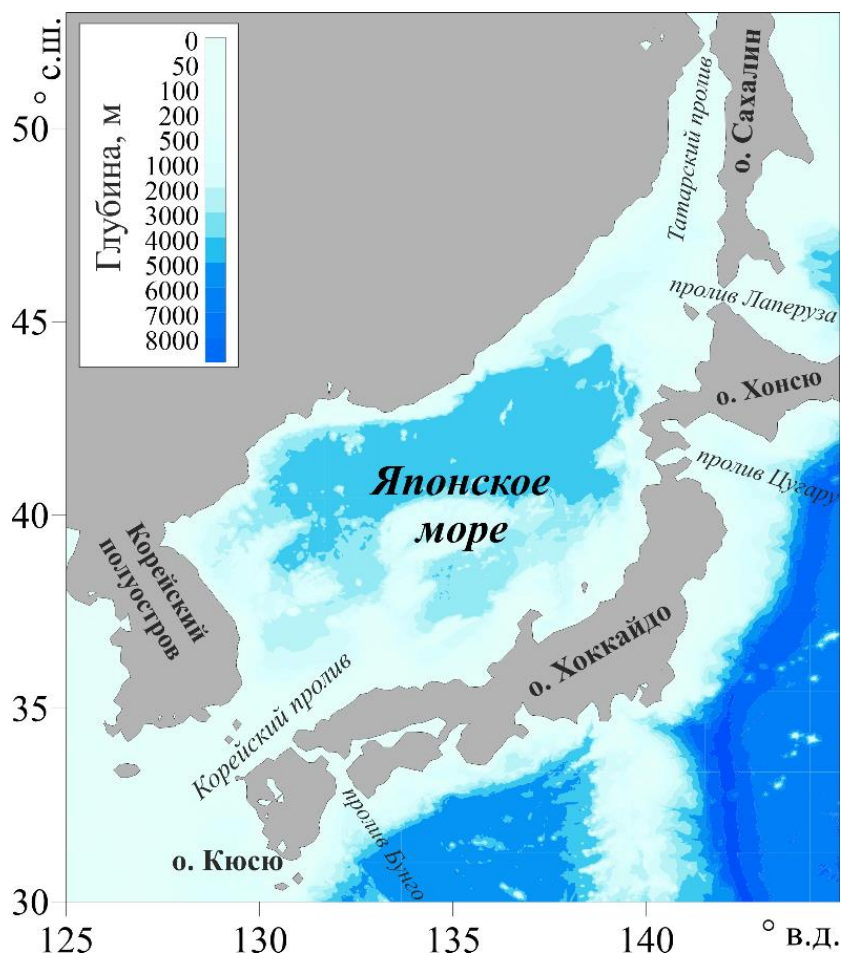


Рис. 4. Местоположение Японского моря

На температуру воды Японского моря влияют меридиональная протяженность бассейна и различные климатические характеристики. В силу этих факторов выделяется два температурных сектора относительно 40° с. ш.: теплый (южнее) и холодный (севернее). Из-за циклонических течений на одних и тех же широтах температура выше в восточной половине моря по сравнению с западной. Наибольшие градиенты наблюдаются в зоне фронтов. Вертикальное распределение температур определяется процессами перемешивания и горизонтальной адвекцией. В теплом секторе выделяется три слоя с характерными изменениями температуры

воды с глубиной: от 0 до 250 м (резкие сезонные колебания температуры), от 250 до 400 м (незначительные сезонные колебания и равномерное слабое понижение температуры с глубиной), ниже 400 м (отсутствие сезонных колебаний и постоянство температуры). В холодном — два слоя: от 0 до 250 м (сезонные колебания температуры) и ниже 250 м (отсутствие сезонных колебаний). Минимальные температуры наблюдаются в феврале (4 – 14°C), максимальные – в августе (21 – 29°C) (рис. 5). В разных районах моря сезонные экстремумы температур различаются.

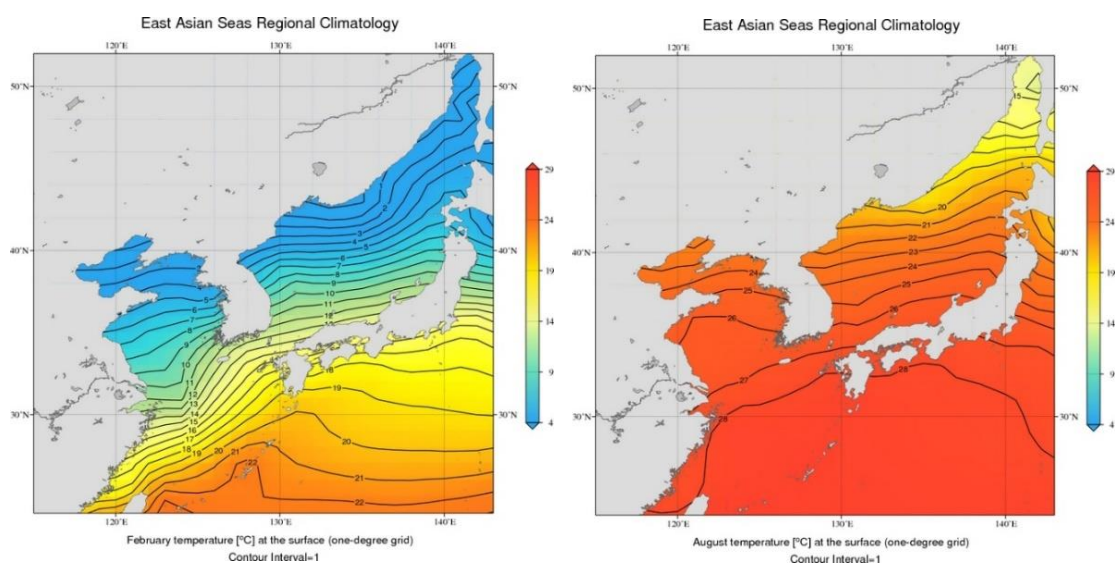


Рис. 5. Температура на поверхности Японского моря в феврале (слева) и в августе (справа) [10]

На распределение солёности в Японском море влияет несущественный материковый сток, значительное испарение, интенсивная осенне-зимняя конвекция, затрудненная связь с Тихим океаном через мелководные проливы и льдообразование в холодном секторе. Локальное опресняющее влияние оказывает прохождение тайфунов и глубоких циклонов над акваторией. По средним годовым значениям область максимальной солёности — центральная часть Японского моря. По мере удаления от материка (с запада на восток) солёность увеличивается. Как и в случае с температурой, в секторах выделяют разное количество слоев. В теплом — три слоя: от 0 до 100 м (резкое возрастание солёности), от 100 м до 400 м (постепенное убывание), ниже 400 м (постоянство солёности). В холодном секторе распределение солёности зависит еще от сезона и от района моря. В целом выделяется два слоя: от 0 до 100 м (постепенное возрастание) и ниже 100 м (постоянство значений). В

прибрежной области в приповерхностном слое (0 – 50 м) летом соленость опускается до 32‰, в придонном слое значения достигают 34‰. Зимой по всей толще наблюдается 34 – 34.1‰ (рис. 6). В этом же сезоне наблюдается максимальное значение солености на поверхности (около 34‰).

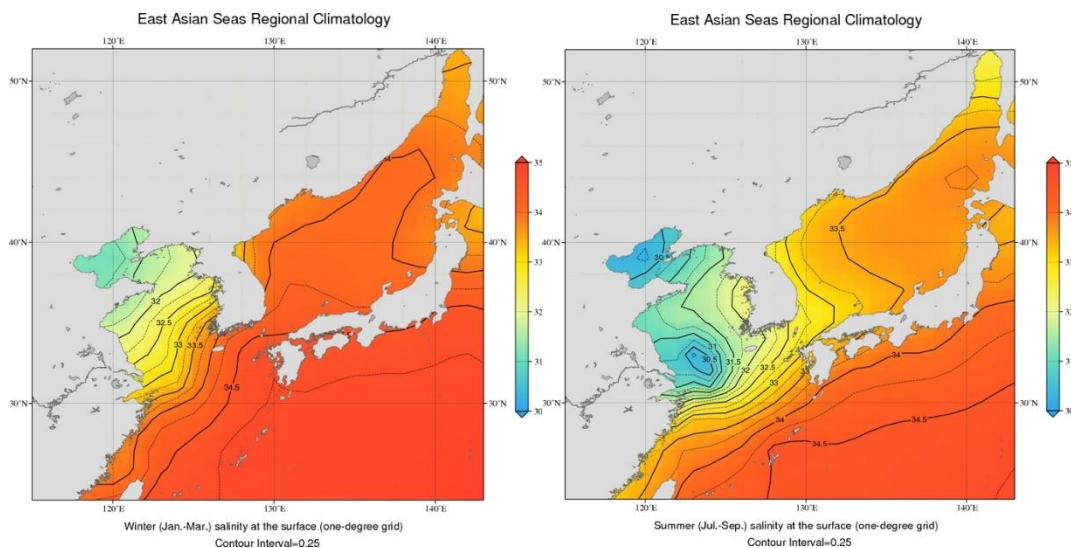


Рис. 6. Соленость на поверхности Японского моря зимой (слева) и летом (справа) [11]

Приходную часть водного баланса составляют осадки и материковый сток. За расходную составляющую отвечает испарение. Особое место занимает водообмен с Тихим океаном через относительно мелководные проливы. Это основа водного баланса Японского моря. Больше всего воды поступает через Корейский пролив на юге, а уходит — через Сангарский и Лаперуза.

Система течений Японского моря (рис. 7) формируется под влиянием водообмена через проливы, бароклинности и рельефа дна. Дрейфовые (ветровые) течения выражены слабо. Выделяют три основных течения: Цусимское, Восточно-Корейское, Приморское. Первое направлено на север от Корейского пролива, второе — также на север, но вдоль Корейского полуострова, а на широте 39 – 40° с. ш. поворачивает на восток и сливается с Цусимским. Севернее оно же дает начало Сангарскому течению. Западная часть системы циклонических круговоротов северной части моря образует Приморское течение. С глубиной схема общей циркуляции не изменяется, лишь уменьшается скорость. С мая по август скорость течений увеличивается почти в 1.5 раза, а зимой они падают.

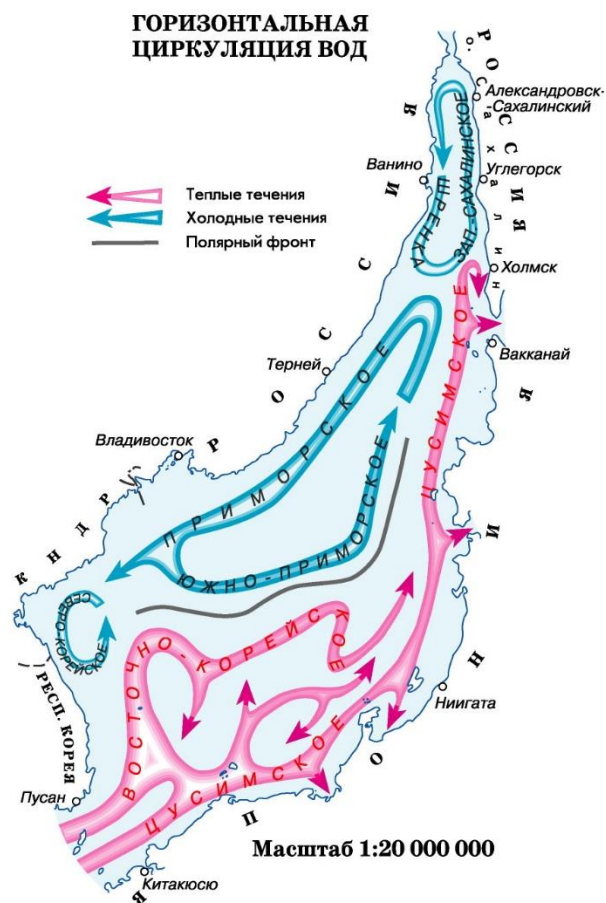


Рис. 7. Схема течений Японского моря [12]

Японское море — это замерзающее море. Льдом покрываются северная и западная части акватории. Встречается неподвижный и дрейфующий лед разных размеров, вплоть до ледяных полей. Первый лед появляется обычно в начале ноября. В зависимости от погодных условий льдообразование может сместиться на 10 – 15 дней. Таяние начинается в марте, в районах, наиболее удаленных от берега. Летом ледовый покров отсутствует.

Акватория Японского моря находится в области муссонного типа погодных условий, связанного с сезонной изменчивостью контрастов температур океана и суши. В течение года регион испытывает влияние Азиатского и Гавайского максимумов и Алеутской депрессии (рис. 8). Смена знака барического поля приводит к изменению преобладающих направлений ветра. По мере приближения к берегу большее значение приобретает топография суши и меньшее — циркуляционные особенности. На западном побережье Японского моря в соответствии с основным переносом воздушных масс зимой преобладающими



являются северные, северо-западные и западные направления, на восточном побережье большой вклад вносят юго-восточные или южные ветры. Средние скорости на побережье составляют 3 – 5 м/с, в открытом море — 7 – 7.5 м/с. На мысах и в открытых преобладающим ветрам местах средние скорости выше. При прохождении тайфунов в южной части моря зафиксированы скорости ветра более 40 м/с. Скорость и направление ветра очень детально отражают влияние местных факторов в прибрежной зоне, поэтому в соседних пунктах ветровые характеристики могут отличаться.

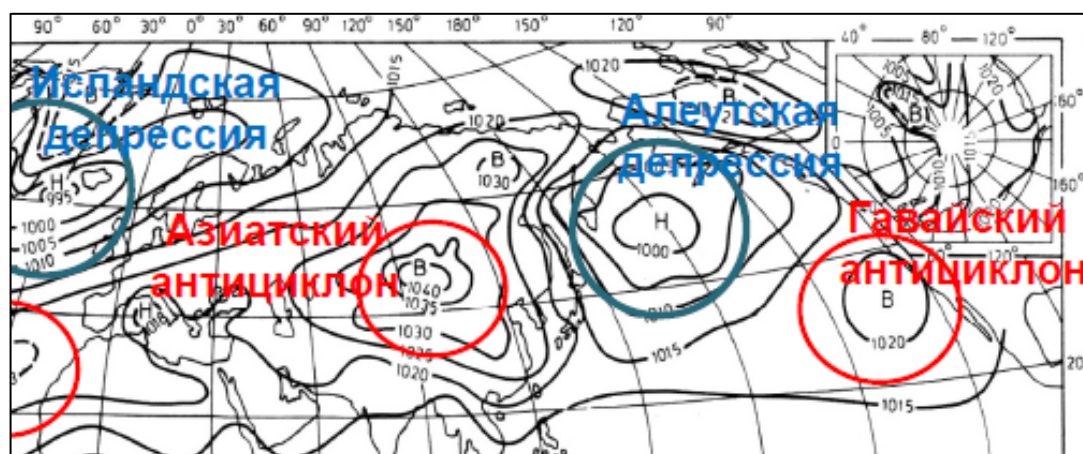


Рис. 8. Схема барических систем, влияющих на климат Японского моря [13]

Ветер вызывает волны, средняя высота которых в Японском море составляет зимой 3.2 м, летом — 1 м. На холодное время года приходится пик активности циклонических вихрей, сопровождающихся сильными ветрами, и муссонные ветры сильнее. Однако последние не вызывают сильных штормов и играют меньшую роль в образовании ветрового волнения, кроме прибрежной части. Максимальная высота волн (8 – 10 м) наблюдается в северной и центральной частях моря. Тайфуны могут образовывать волны высотой до 12 м.

Выделяют два типа синоптических процессов: летний и зимний, отражающих преобладание тех или иных барических систем. В марте и октябре они сменяют друг друга. В августе – первой половине сентября термические контрасты между сушей и океаном минимальны. Далее в силу небольшого теплозапаса материка процесс его выхолаживания протекает быстро. Температура воздуха над Тихим океаном и дальневосточными морями понижается относительно медленно. Начинается перестройка барического поля у земли и в тропосфере на зимний режим.

Осенью смена типа синоптических процессов сопровождается тайфунами — глубокими циклоническими вихрями небольшого размера (300 – 400 км), но значительной силы, без фронтальной зоны. Они существенно нарушают муссонный характер переноса воздушных масс. Континентальные характерны для теплого полугодия, морские — для холодного. Последние образуются либо над Японским морем, либо выходят сюда из других районов. Здесь происходит их регенерация и дальнейшее продвижение к востоку, северо-востоку в соответствии со структурой высотного термобарического поля.

Тайфун образует большое количество волн с различными периодами, высотами и направлениями. Об этом говорит подобие характерных пиков во временном ходе [14]. Существует мнение, что самые опасные волны образуются в части циклона, где направление ветра совпадает с траекторией вихря (справа от направления движения). В центральной области тайфуна возникает интерференция различных систем волн. В заливах и бухтах могут наблюдаться другая система волн и ветровые условия.

Тайфуны — это также одна из причин, вызывающая изменение уровня моря — значение уровня после осреднения короткопериодных колебаний, вызванных ветровыми волнами [7]. Сезонная и многолетняя изменчивость полей атмосферного давления, ветра, плотности морской воды, ледяного покрова, стока рек (особенно в прибрежных областях), тектонических процессов в недрах Земли — все эти факторы влияют на изменение уровня моря. В Японском море выделяется два характерных типа хода уровня моря: полугодовой — на юго-восточном побережье о. Сахалин, и неправильный годовой — почти все остальное побережье моря. В открытом океане уровень моря изменяется по закону обратного барометра: увеличение (уменьшение) атмосферного давления на 1 гПа вызывает уменьшение (увеличение) уровня моря на 1 см. Нарушение закона обратного барометра в прибрежных районах океана объясняется главным образом резонансными эффектами, возникающими при распространении волн нагона на континентальном шельфе и возрастанием роли ветра в формировании колебаний уровня моря.

Колебания уровня моря делятся на периодические и непериодические. К первым относятся приливы. В Японском море приливные явления возникают в основном под влиянием приливных волн, поступающих из Восточно-Китайского

моря через Корейский пролив. Эти волны формируют в море собственные колебания по типу стоячей преимущественно полусуточной приливной волны с двумя узловыми линиями в Корейском и Татарском проливах. Поэтому колебания в этих районах находятся в противофазе по сравнению с колебаниями уровня в центральной части моря. В Японском море наблюдаются полусуточный, суточный и смешанный приливы. В Корейском и северной части Татарского пролива отмечаются полусуточные приливы, в центральной части моря — суточные приливы. Смешанные встречаются лишь в переходных зонах и внутри таких крупных заливов, как Восточно-Китайский и Петра Великого. Приливные колебания уровня максимальны — до 3 м — у южного входа в Корейский пролив. Затем к северу на выходе из пролива величина снижается и в центральной части моря не превышает 0.5 м. Суживающаяся воронкообразная форма Татарского пролива обуславливает возрастание приливных колебаний уровня, которые в вершине пролива достигают максимальных значений (2.3 – 2.8 м) [14].

Остальные рассматриваемые изменения уровня моря относятся к непериодическим (остаточным), которые можно выделить после вычитания приливов из суммарного ряда.

На сгонно-нагонные колебания в Японском море влияют муссонные ветра. Такие изменения носят сезонный характер: летом уровень в южной и восточной частях моря понижается и растет в северной и западной, зимой — наоборот. Сезонные колебания составляют около 25 см. Во время штормов нагон накладывается на ветровые волны высотой 3 – 5 м. Период сгонно-нагонных колебаний составляет от нескольких часов до 1,5 суток. Во всех пунктах отмечается асимметричная форма нагонов — подъем уровня происходит значительно быстрее спада. Одна из возможных причин — в первом приближении скорость изменения уровня пропорциональна скорости движения циклона (основной причине формирования нагонов).

В заливах и бухтах наблюдаются собственные стоячие колебания — сейши. Их периоды колеблются от десятков минут до часа в зависимости от морфометрических характеристик бассейна, а высота волн — около 0,5 м. При прохождении тайфуна нагоны и сейши усиливают друг друга и уровень может подниматься на 1 м.

Нелинейное взаимодействие ветровых волн образует инфрагравитационные волны с периодами 3 – 5 минут [8].

В Японском море наблюдаются и цунами, возникающие в результате сильных неглубоких (до 40 км) землетрясений в пределах акватории. Эти волны возникают реже по сравнению с побережьями Тихого океана, и их сила не настолько разрушительна. Максимальных высот цунами достигают в вершинах клинообразных заливов. Одни из последних сильнейших цунами наблюдались в Японском море в 1983 и 1993 г. На всех станциях они имели разные последствия. Максимальный горизонтальный заплеск от цунами 26 мая 1983 г. наблюдался в Лидовке и составлял 800 м. Наибольший вертикальный перепад высот (9 м) отмечался в устье р. Каменка. В закрытых бухтах Преображения и Владивостока зафиксирован размах колебаний 0.7 – 2.2 м. Цунами 13 июля 1993 г. проявлялось в виде сейш и повышенного уровня моря в виде сильного прилива. Самыми сильными были первые три волны. В некоторых пунктах эта волна цунами была сильнее, чем в 1983 г. (Глазовка, залив Владимира). По р. Маргаритовка волна цунами проникла на расстояние 3 – 5 км. В Рудной Пристани, первой станции, до которой дошло цунами, горизонтальный заплеск составил 200 – 300 м [14]. На о. Окушири высота этого цунами составила 31 м и привело к уничтожению целого поселения и большому количеству жертв.

## Глава 3. Данные и методы

### 3.1 Описание данных

В основе исследования лежат данные колебаний уровня моря, полученные с прибрежных гидростатических датчиков уровня моря, которые установлены в рамках Федеральной целевой программы Российской службы предупреждения о цунами. Создание сети автоматизированных постов инструментальных наблюдений за уровнем моря осуществлялось при активном участии ДВНИГМИ (который на данный момент предоставляет краткосрочный прогноз изменения уровня моря на побережье Охотского моря, северной части Японского моря, на восточном побережье полуострова Камчатка [15]), Дальневосточных управлений по гидрометеорологии, других учреждений Росгидромета, проектных и строительных организаций [16].

При дальнейшем анализе данных необходимо учитывать локальные особенности местоположения приборов и степень их защищенности от волнения открытого моря. В Рудной Пристани мареограф установлен у входа в портовый ковш, то есть прикрыт от волнения с юга и юго-востока мысом Бринера (рис. 9). В Находке, которая вся хорошо защищена от штормов и считается одним из самых безопасных портов на Дальнем Востоке, — в бухте Находка, хотя здесь часто наблюдается сложная система резонансных колебаний (рис. 10). Во Владивостоке наблюдается похожая ситуация — хоть порт и защищен от волн открытого моря, большую опасность представляют резонансные колебания (рис. 11) [17].

Для анализа взяты данные колебаний уровня моря в 11 пунктах: 7 российских (Владивосток, Находка, Посьет, Рудная Пристань, Сосуново, Советская Гавань, Преображение) [18] и 4 зарубежных (Пусан, Хамада, Нагасаки, Сайго) [19] (рис. 12, табл. 1). Все данные покрывали период времени с 1 июня 2020 г. по 15 сентября 2020 г. Временная дискретность записей составляла 1 минуту с разрешением 1 см. При этом в ходе анализа было обнаружено, что для трех российских станций (Посьет, Владивосток и Находка) значения уровня в основном имеют реальную дискретность 2 см. Кроме того, в рядах для всех станций, кроме Находки, пропущено от 3 (Рудная Пристань) до 2578 (Советская Гавань) минут

измерений, однако они составляют менее 1.7% от длины всего ряда данных (табл. 3.2).

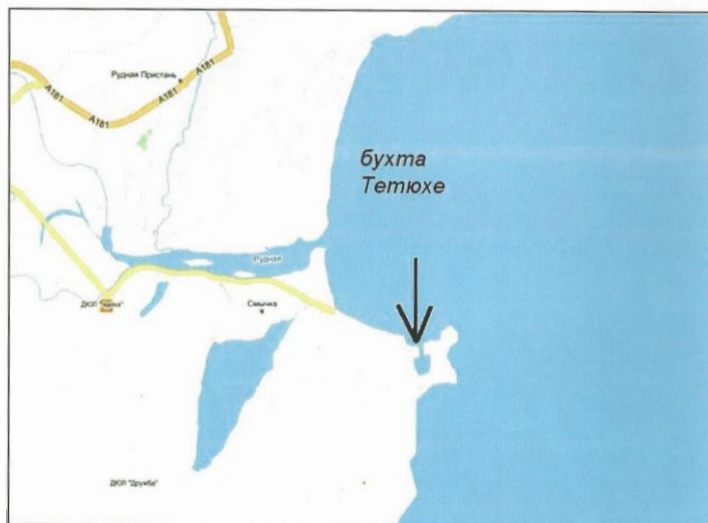


Рис. 9. Расположение самописца уровня в Рудной Пристани [17]



Рис. 10. Расположение самописца уровня в Находке [17]



Рис. 11. Расположение самописца уровня во Владивостоке [17]

Таблица 1. Координаты пунктов

Пункт	Широта, ° с. ш.	Долгота, ° в. д.
Советская Гавань	48.97	140.29
Сосуново	46.53	138.33
Рудная Пристань	44.37	135.83
Преображение	42.90	133.90
Находка	42.80	132.92
Владивосток	43.11	131.90
Посьет	42.65	130.80
Пусан	35.09	129.04
Сайго	36.20	133.33
Хамада	34.90	132.07
Нагасаки	32.74	129.87

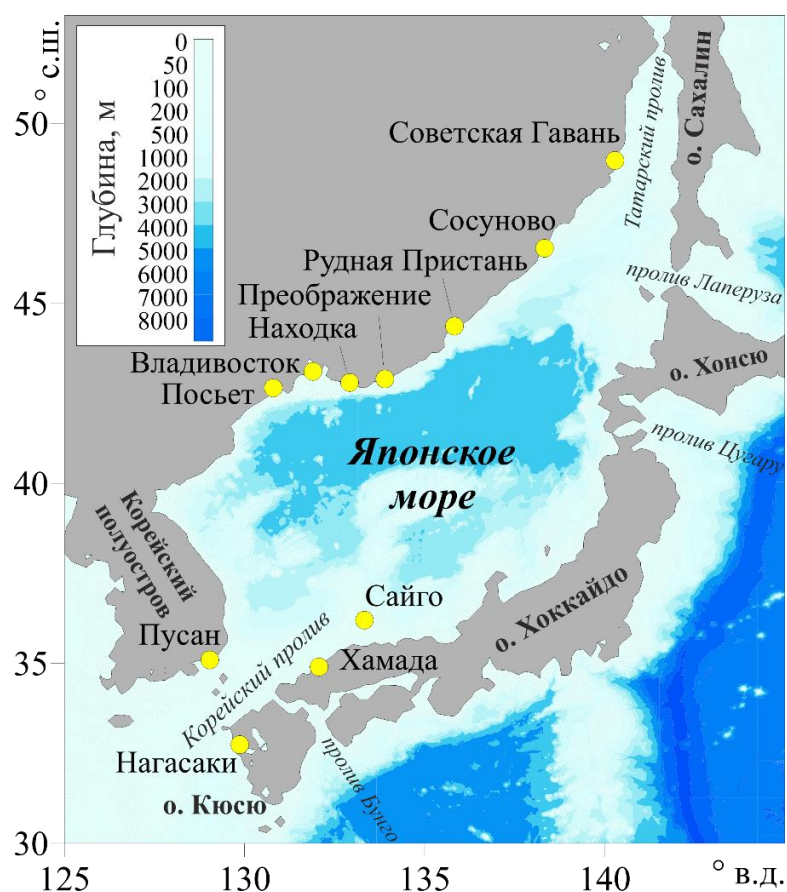


Рис. 12. Схема расположения пунктов

Таблица 2. Количество пропусков в рядах данных и их доля в %

Пункт	Кол-во измерений	Кол-во с восполненными данными	Кол-во пропусков	Доля, %
Советская Гавань	151502	154081	2579	1.67
Сосуново	154049	154081	32	0.02
Рудная Пристань	154077	154081	4	0.00
Преображение	154012	154081	69	0.04
Находка	154081	154081	0	0.00
Владивосток	154073	154081	8	0.01
Посьет	153962	154081	119	0.08
Пусан	154031	154081	50	0.03
Сайго	153241	154081	840	0.55
Хамада	153241	154081	840	0.55
Нагасаки	153241	154081	840	0.55

Помимо данных колебаний уровня моря для выявления особенностей волнового взаимодействия и изучения инфрагравитационных волн в отдельных пунктах используются временные поля значительной высоты ветровых волн из реанализа ERA5 за тот же период. Используются также данные о давлении на уровне моря и о ветре на высоте 10 м для установления связи между



метеорологическими характеристиками в момент прохождения тайфунов над пунктами, до и после этого. Реанализ ERA5 — это пятое поколение реанализов ECMWF. Он предоставляет ежечасную информацию о погоде и характеристиках подстилающей поверхности по всему земному шару с 1950 г. Реанализ объединяет данные мировых моделей и наблюдения, поступающие каждые 12 часов [20, 21].

## 3.2 Методы

### 3.2.1 Гармонический анализ

Гармонический анализ приливных колебаний уровня моря — один из начальных этапов обработки данных. Этот подход основан на разложении потенциала приливообразующих сил Луны и Солнца в тригонометрический ряд по определенным частотам. Эти частоты представляют собой различные комбинации сумм и разностей 6 фундаментальных частот, определяемых собственным вращением Земли, Земли и Луны вокруг общего центра масс, Земли вокруг Солнца, периодичностью положения лунного перигея (8.85 года), прецессией лунной орбиты с периодом 18.6 года, а также периодичностью положения перигелия (около 21 000 лет) [22]. До выполнения этого этапа работы необходимо убедиться в том, что отсутствуют или заполнены все пропуски и удалены все искусственные выбросы из рядов. Гармонический анализ позволяет рассчитать гармонические постоянные прилива (амплитуды и фазы отдельных приливных составляющих) и воспроизвести приливные колебания уровня для заданного промежутка времени. В данном исследовании предвычисленный прилив вычитается из суммарного ряда. Преимущество данного метода состоит в практически полном отсутствии искажений высот и периодов непериодических колебаний (остаточного ряда). В то же время предвычисление прилива по гармоническим постоянным не позволяет достаточно полно описать временной ход прилива из-за ограниченного числа гармоник и сезонной изменчивости их амплитуд и фаз [14]. Особое внимание уделено двум суточным ( $O_1$  и  $K_1$ ) и трем полусуточным ( $M_2$ ,  $N_2$  и  $S_2$ ) гармоникам. По посчитанному соотношению

$$F = \frac{(O_1 + K_1)}{(M_2 + S_2)},$$

где в дроби стоят значения высот соответствующих гармоник, выявлен тип приливов в каждом пункте:

$0 < F < 0.25$  — правильный полусуточный прилив,

$0.25 < F < 1.5$  — неправильный полусуточный прилив,

$1.5 < F < 3$  — неправильный суточный прилив,

$F > 3$  — правильный суточный прилив [7].

Для качественного вычитания приливов для Нагасаки исходные минутные ряды уровня осреднены, и получены часовые данные (значение каждый час). Необходимость возникла из-за наличия в остаточном уровне периодических колебаний, связанных, вероятно, с техническими ошибками. Однако разница между анализами для двух рядов небольшая.

### 3.2.2 Спектральный анализ

Спектральный анализ является наиболее эффективным средством исследования случайных (стохастических) процессов, т.е. таких процессов, для описания которых (в отличие от детерминированных), требуются вероятностные понятия и статистические характеристики.

Важнейшими условиями, необходимыми для корректного применения спектрального анализа, являются условия стационарности и эргодичности исследуемого процесса. Стационарным случайным процессом называется процесс, основные статистические характеристики которого (среднее значение, дисперсия, корреляционная функция) не зависят от времени. Эргодическим называется случайный стационарный процесс, для которого усреднение по времени для любой отдельной реализации эквивалентно соответствующему осреднению по ансамблю реализаций [24]. Оба условия выполняются для предмета исследования — колебаний уровня моря.

Спектральный анализ процесса волнения основан на представлении его сложной структуры как суперпозиции большого числа элементарных составляющих, а именно, плоских синусоидальных волн различных амплитуд, частот, фаз и направлений распространения. Распределение энергии волн по их частотам и направлениям называется энергетическим спектром волнения.

При вычислении энергетического спектра волн, смещения частиц воды рассматриваются как случайный процесс, представляющий собой суперпозицию указанных выше элементарных составляющих. Частотный интервал спектра можно разделить на три области: область, охватывающую восходящую ветвь спектра и основной максимум спектральной плотности, равновесную область и очень небольшой переходный участок спектра между указанными областями [25].

Спектральный анализ включает в себя построение графиков спектральной плотности, определения периода у пиков и их интерпретацию. Как правило, эти локальные экстремумы имеют определенный период, характерный для нагонов, сейш или инфрагравитационных волн.

Вычислены и построены также спектральные отношения для каждого тайфуна по пунктам — функция источника и топографическая передаточная функция. Первая показывает изменение энергии колебаний разной частоты во время штормов, вторая — трансформацию волн открытого моря по мере приближения к станции в прибрежной зоне. Функция источника  $R(\omega)$  рассчитывается по формуле

$$R(\omega) = \frac{S_{\text{набл}}(\omega)}{S_{\text{фон}}(\omega)},$$

где  $\omega$  — частота спектральной гармоники,  $S_{\text{набл}}(\omega)$  — спектр во время прохождения тайфуна,  $S_{\text{фон}}(\omega)$  — спектр фоновых колебаний. Топографическая передаточная функция  $H(\omega)$  вычисляется как

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{S_{\text{фон}}(\omega)}{\omega^{-2}}} [26].$$

Для рассмотрения изменения спектральной плотности по времени используется спектрально-временной анализ, схожий с Wavelet-анализом на основе метода Морле [27].

### 3.2.3 Статистический анализ

Первичный статистический анализ общего и остаточного рядов колебания уровня моря для каждой станции заключается в определении максимального, минимального и среднего значений, медианы, стандартного отклонения и дисперсии (табл. 5.1 и 5.3).

Среднее арифметическое определяется как число, равное сумме всех значений, деленной на их количество. Оно считается по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n),$$

где  $\bar{x}$  – среднее арифметическое,  $n$  – количество значений,  $x_n$  – значение. Проблема использования этой характеристики при анализе данных состоит в ее сильной подверженности влиянию «больших отклонений». Из-за этого в некоторых случаях вместо среднего рассчитывалась медиана.

Медиана определяется как число, стоящее в середине ряда значений, выстроенных по возрастанию или по убыванию. Если в ряду четное количество различных значений, то медианой является среднее арифметическое двух «средних» значений.

Дисперсия — это мера разброса величины относительно ее математического ожидания (среднего, взвешенного по вероятностям возможных значений). В ее формуле расчета используется математическое ожидание, рассчитываемое как

$$\mu[X] = \sum_{i=1}^k x_i p_i = x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_k p_k,$$

где  $\mu[X]$  – математическое ожидание ряда  $X$ ,  $x_k$  – значение,  $p_k$  – вероятность наступления значения. Формула дисперсии выглядит так:

$$D[X] = \mu[(X - \mu[X])^2],$$

Стандартное отклонение, как и дисперсия, показывает, насколько далеко значение находится от математического ожидания ряда. Оно используется при расчете стандартной ошибки среднего арифметического, при построении доверительных интервалов и других операций математической статистики. Стандартное отклонение считается по формуле

$$\sigma = \sqrt{D[X]},$$

Нормальное распределение — это распределение вероятностей, которое в одномерном случае задаётся функцией плотности вероятности, совпадающей с функцией Гаусса:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

Распределение случайных величин стремится к нормальному (рис. 5.3).

Мода — это значение, которое встречается в ряду чаще всего. Наличие более одной моды указывает на то, что распределение данных величин не подчиняется нормальному закону. Для дискретных распределений модой считают любое значение, вероятность которого больше, чем вероятности соседних значений.

Ковариация отражает линейную зависимость двух величин. Если ковариация положительна, то с ростом значений одной случайной величины, значения второй имеют тенденцию возрастать, а если знак отрицательный — убывать. Однако только по абсолютному значению ковариации нельзя судить о том, насколько сильно величины взаимосвязаны, так как масштаб ковариации зависит от их дисперсий. Рассчитывается по формуле

$$\text{cov}(X, Y) = \mu[(X - \mu[X])(Y - \mu[Y])],$$

где  $\mu[X]$  — математическое ожидание ряда  $X$ ,  $\mu[Y]$  — математическое ожидание ряда  $Y$ .

Корреляция показывает взаимосвязь рядов. Ее математическая мера — коэффициент корреляции  $R$ , изменяющийся от -1 до 1. При  $R < 0$  зависимость между величинами обратная, при  $R = 0$  связь отсутствует, при  $R > 0$  зависимость называется прямой. В случае если изменение одной случайной величины не ведёт к закономерному изменению другой случайной величины, но приводит к изменению другой статистической характеристики данной случайной величины, то подобная связь не считается корреляционной. Проблема корреляции заключается в том, что при высоком коэффициенте корреляции могут отсутствовать причинно-следственные связи, то есть физически ряды данных никак не связаны. В то же время, отсутствие корреляции между двумя величинами ещё не значит, что между ними нет никакой связи. Например, зависимость может иметь сложный нелинейный характер, который корреляция не выявляет. Коэффициент корреляции вычисляется по формуле

$$R_{X,Y} = \text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\mu[(X - \mu[X])(Y - \mu[Y])]}{\sigma_X \sigma_Y}.$$

## Глава 4. Особенности приливных колебаний уровня Японского моря

Приливы — это периодические колебания уровня моря, вызванные приливообразующими силами Луны и Солнца. В Японском море они относительно слабые: от 0.5 внутри акватории до 3 м на южном входе в Корейский пролив. Приливы в Японском море формируются за счет приливной волны из Восточно-Китайского моря, образующей собственные колебания моря по типу стоячей преимущественно полусуточной приливной волны [14].

Для 11 станций с помощью метода наименьших квадратов были рассчитаны 35 гармоник и предвычислены приливные составляющие для 3.5 месяцев по рядам данных. В рамках текущего исследования будут рассмотрены только 5 основных составляющих: 2 суточных ( $K_1$ ,  $O_1$ ) и 3 полусуточных ( $M_2$ ,  $N_2$ ,  $S_2$ ). Для  $K_1$  и  $M_2$  по результатам модели ТРХО9 [28] построены карта-схемы их амплитуд для Японского моря и прилегающих акваторий (рис. 13). Максимальных амплитуд все гармоники достигают в Нагасаки (табл. 3). Практически на всех пунктах в акватории Японского моря, кроме Пусана и Советской Гавани, амплитуда гармоник не превышает 10 см.

Максимальные высоты приливов наблюдаются в Татарском и Корейском проливах — более 2.5 м. В центральной части моря преобладают суточные приливы, в проливах на севере и на юге моря — полусуточные [14]. Это подтверждается отношением амплитуд основных суточных гармоник к амплитудам основных полусуточных гармоник  $F$  (табл. 3).

Исходя из амплитуд предвычисленных приливов, правильный полусуточный прилив наблюдается только в Пусане ( $F = 0.13$ ). Правильных суточных приливов нет ни в одном из пунктов. Суточные гармоники преобладают в Сосуново ( $F = 2.52$ ) и Хамаде ( $F = 1.66$ ), где их амплитуда больше, чем амплитуда гармоники  $M_2$ . На остальных станциях наблюдаются неправильные полусуточные приливы. Закономерности периодических колебаний проявляется на графиках изменения уровня во время приливных циклов (рис. 14), на которых отмечены сизигийные и квадратурные приливы. Для Сосуново разница максимальных и минимальных значений около 8 см, для Находки — около 12 см, для Пусана — около 40 см.

Для всех пунктов были рассчитаны высота сизигийного прилива  $R_{spr}$  и максимальная величина прилива  $R_{abs}$  (табл. 3) [29]:

$$R_{spr} = 2(H_{M_2} + H_{S_2}),$$

$$R_{abs} = 2(H_{M_2} + H_{S_2} + H_{O_1} + H_{K_1}).$$

Самый высокий сизигийный прилив наблюдается в Нагасаки (218 см), а самый низкий — в Сосуново (8 см). Помимо Нагасаки высота прилива превышает 1 м только в Пусане. Максимальная величина прилива в Нагасаки (314.9 см) более, чем в 2.5 раза, выше, чем в Пусане (116 см) — втором по высоте приливов пункте. Значения в остальных пунктах варьируются от 29 см (Сосуново) до 66 см (Советская Гавань).

Для более качественного вычитания приливов в Нагасаки исходные минутные данные об уровне моря были осреднены по часу, что, однако, не дало кардинальных различий ни в этом японском порту, ни в остальных анализируемых (табл. 4).

В рамках данной работы приливы не являются предметом исследования. Они предвычислены для вычитания из суммарного уровня для последующего анализа неперiodических колебаний уровня моря.

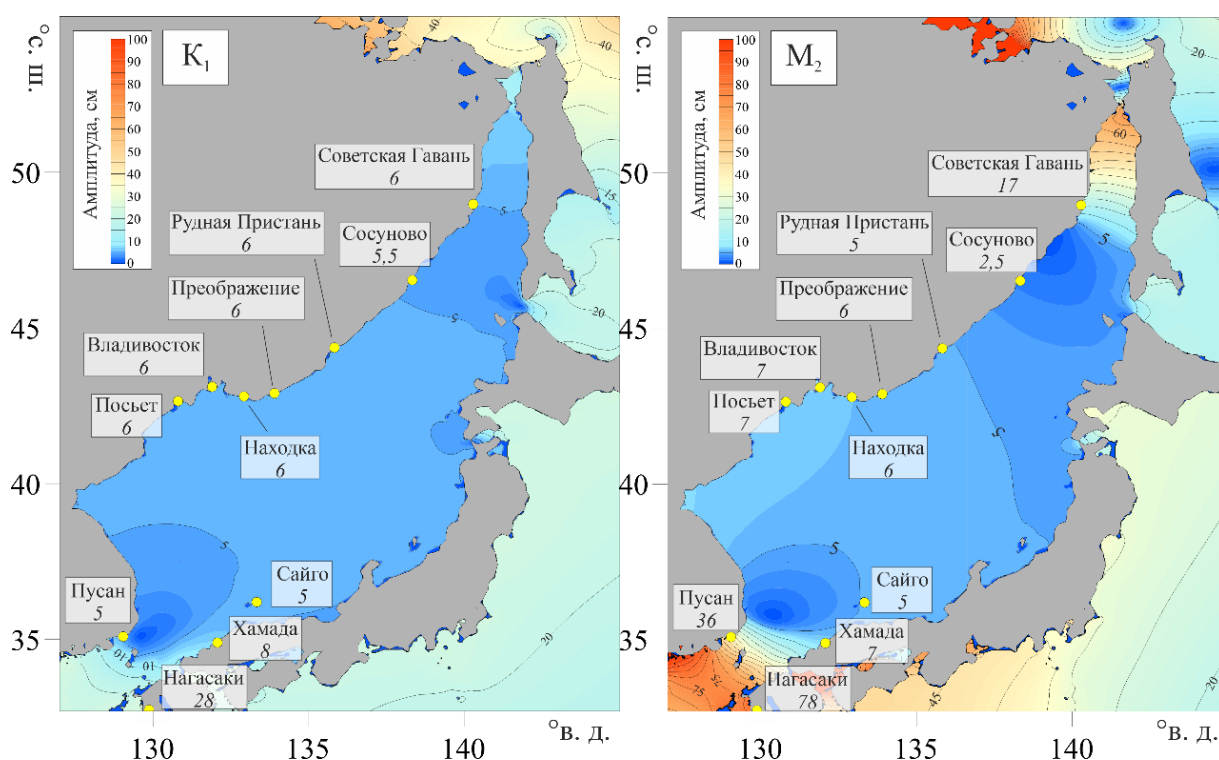


Рис. 13. Амплитуда суточной солнечной гармоника K<sub>1</sub> (слева) и полусуточной лунной гармоника M<sub>2</sub> (справа) в пунктах наблюдения (по данным модели TRXO9)

Таблица 3. Амплитуда (см) основных гармоник в пунктах, отношение амплитуд основных суточных гармоник к амплитудам основных полусуточных гармоник, определяющее характер прилива ( $F$ ), величина (высота) сизигийного прилива  $R_{spr}$  и максимальная величина прилива  $R_{abs}$

Гармоника	$O_1$	$K_1$	$N_2$	$M_2$	$S_2$	$F$	$R_{spr}$	$R_{abs}$
Период, ч	25.82	23.93	12.66	12.42	12.00			
Советская Гавань	5.10	5.93	4.46	17.16	4.66	0.51	43.6	65.7
Сосуново	5.01	5.52	0.44	2.53	1.64	2.52	8.3	29.4
Рудная Пристань	5.12	5.80	1.05	5.44	2.30	1.41	15.5	37.3
Преображение	5.42	5.98	1.25	6.08	2.24	1.37	16.6	39.4
Находка	5.23	5.67	1.19	5.60	1.99	1.44	15.2	37.0
Владивосток	5.66	6.08	1.60	7.40	2.74	1.16	20.3	43.8
Посъет	5.42	5.81	1.50	7.42	2.70	1.11	20.2	42.7
Пусан	2.07	4.78	7.14	35.79	15.34	0.13	102.2	116.0
Сайго	5.82	5.15	1.38	5.33	1.67	1.57	14.0	35.9
Хамада	9.65	7.95	1.78	7.29	3.34	1.66	21.3	56.5
Нагасаки	20.26	28.09	14.70	77.96	31.12	0.44	218.2	314.9

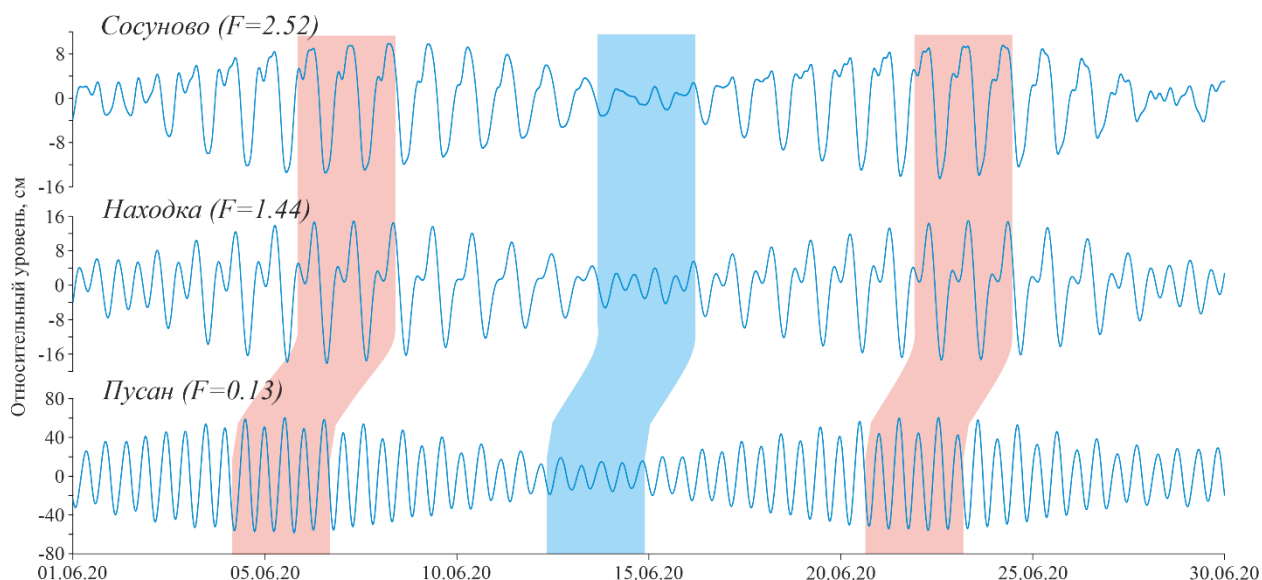


Рис. 14. Предвычисленные приливы для 3-х станций для июня 2020 г., где красным выделены сизигийные приливы, синим — квадратурные ( $F$  – отношение амплитуд основных суточных гармоник к амплитудам основных полусуточных гармоник, определяющее характер прилива)

Таблица 4. Амплитуда (см) основных гармоник по минутным и часовым, осредненным по минутным, рядам

Гармоники	Нагасаки		Находка	
	Минутные	Часовые	Минутные	Часовые
$O_1$	20.26	20.21	5.23	4.93
$K_1$	28.09	28.01	5.67	5.52
$N_2$	14.70	14.54	1.19	0.90
$M_2$	77.96	77.13	5.60	5.49
$S_2$	31.12	30.77	1.99	2.16



## Глава 5. Статистический анализ колебаний уровня Японского моря

Статистический анализ полученных результатов на каждом этапе исследования заключается в подсчете основных статистических параметров.

Для суммарных колебаний в 11 пунктах посчитаны максимальные и минимальные отметки уровня относительно среднего за 3.5 месяца, медиану и стандартное отклонение  $\sigma$  (табл. 5). Максимальный размах колебаний зафиксирован в Нагасаки (351 см). Размах более 1.5 м наблюдается в Преображении (185 см) и Пусане (196 см), 1 м и менее — в Советской Гавани (100 см), Сосуново (82 см), Находке (96 см), Сайго (71 см). Нагасаки — единственный пункт, где минимальное значение относительно среднего уровня больше по модулю, чем максимальное. Остальные станции можно разделить на 2 группы: где максимальное и минимальное значения сопоставимы по модулю и где высшая отметка превышает низшую по модулю в 1.5 – 2.5 раза. К первой относятся Советская Гавань (4 см), Сосуново (2 см), Сайго (1 см), ко второй — остальные. Самое большое значение  $\sigma$  для суммарных рядов наблюдается в Нагасаки. Это объясняется преобладающей в колебаниях ролью приливов. Энергия от изменения уровня периодическими колебаниями превышает энергию инфрагравитационных и ветровых волн.

Таблица 5. Статистические характеристики суммарных рядов в см: мин – минимальный уровень, макс – максимальный уровень,  $\sigma$  – стандартное отклонение (\* – относительно среднего уровня)

Пункт	Мин*	Макс*	Медиана	$\sigma$
Советская Гавань	-48	52	163	16.0
Сосуново	-40	42	245	10.1
Рудная Пристань	-48	73	381	11.2
Преображение	-68	117	226	11.9
Находка	-35	61	468	11.6
Владивосток	-38	93	479	13.1
Посьет	-36	95	443	13.0
Пусан	-76	120	85	29.4
Сайго	-35	36	226	9.8
Хамада	-42	75	245	14.0
Нагасаки	-186	165	244	66.1

Для суммарных колебаний проведен анализ количества пропусков в рядах и посчитана их доля. Самый полный ряд наблюдений, без единого пропуска,

принадлежит Находке. Больше всего пропусков в Советской Гавани (1.67%). В Сайго, Хамаде и Нагасаки доля пропусков составляет 0.55%. Одинаковое количество пропусков в рядах японских станций может быть связано с техническими проблемами. На остальных станциях — меньше 0.1% (табл. 6).

Таблица 6. Количество пропусков в рядах данных и их доля в %

Пункт	Кол-во измерений	Кол-во с восполненными данными	Кол-во пропусков	Доля, %
Советская Гавань	151502	154081	2579	1.67
Сосуново	154049	154081	32	0.02
Рудная Пристань	154077	154081	4	0.00
Преображение	154012	154081	69	0.04
Находка	154081	154081	0	0.00
Владивосток	154073	154081	8	0.01
Посьет	153962	154081	119	0.08
Пусан	154031	154081	50	0.03
Сайго	153241	154081	840	0.55
Хамада	153241	154081	840	0.55
Нагасаки	153241	154081	840	0.55

После вычитания приливов для остаточного уровня посчитаны те же статистические параметры (табл. 7). Максимальный размах для этих рядов наблюдается в Преображении (185 см). В Пусане размах составляет 151 см. Разница значений более 1 м зафиксирована также в Рудной Пристани (110 см), Владивостоке (121 см), Посьете (118 см), Хамаде (104 см), Нагасаки (122 см). Минимальный размах в Сайго (54 см). Минимальные отметки варьируются от 18 до 55 см по модулю, максимальные — от 36 до 130 см. Сравнительно симметричны значения относительно среднего уровня только в Советской Гавани и Сосуново.

Для суммарных и остаточных колебаний уровня проведено сравнение средних значений уровня и медианы (табл. 8). В обоих случаях для 6 станций они различаются: в первом в пределах 5 см, во втором — в пределах 2 см. Наибольшая разница для суммарных колебаний — в Нагасаки (5 см), для остаточных рядов — в Находке, Владивостоке, Посьете (2 см). В обоих случаях среднее и медиана совпадают для Рудной Пристани и Сайго, а различаются — в Посьете, Хамаде и Нагасаки. Причина отличия значений заключается в асимметричности подъема и падения уровня моря.

Таблица 7. Статистические характеристики остаточных рядов в см: мин – минимальный уровень, макс – максимальный уровень,  $\sigma$  – стандартное отклонение (\* – относительно среднего уровня)

Пункт	Мин*	Макс*	Медиана	$\sigma$
Советская Гавань	-42	36	164	7.3
Сосуново	-40	37	244	8.2
Рудная Пристань	-42	68	381	8.7
Преображение	-55	130	225	9.2
Находка	-38	55	466	9.2
Владивосток	-42	79	477	10.1
Посьет	-37	81	442	10.1
Пусан	-29	122	84	8.7
Сайго	-18	36	226	6.6
Хамада	-37	67	246	8.7
Нагасаки	-52	70	238	11.6

Таблица 8. Медиана и средний уровень суммарных и остаточных колебаний

Пункт	Суммарные колебания		Остаточные колебания	
	Медиана, см	Среднее, см	Медиана, см	Среднее, см
Советская Гавань	163	164	164	164
Сосуново	245	244	244	244
Рудная Пристань	381	381	381	381
Преображение	226	226	225	226
Находка	468	468	466	468
Владивосток	479	479	477	479
Посьет	443	444	442	444
Пусан	85	84	84	84
Сайго	226	226	226	226
Хамада	245	247	246	247
Нагасаки	244	239	238	239

Дисперсия для суммарных, приливных и непериодических рядов посчитана для определения доли приливов в изменении уровня в 6 пунктах: Советской Гавани, Рудной Пристани, Преображении, Владивостоке, Пусане и Нагасаки (табл. 9). Характер колебаний на остальных станциях похож на вышеперечисленные. Также для 6 указанных пунктов построены гистограммы обеспеченности относительно среднего уровня для суммарных, приливных и непериодических рядов (рис. 15 – 17).

Самое большое влияние на изменение уровня моря приливы оказывают в Нагасаки (97%). Меньше всего — в Рудной Пристани, Преображении и Владивостоке (40%). Преобладание полусуточных приливов ярче всего проявляется в Пусане в виде двух пиков приливной гистограммы (рис. 16). Хуже это прослеживается в Нагасаки и Советской Гавани, так как в этих пунктах приливы

неправильные полусуточные. В Рудной Пристани, Преображении и Владивостоке единственный пик приходится на первые 10 см — преобладают неправильные суточные приливы.

Таблица 9. Дисперсия для суммарных, приливных и непериодических колебаний в см<sup>2</sup> и доля двух последних видов в суммарных в %

Пункт	Суммарные, см <sup>2</sup>	Приливные		Непериодические	
		см <sup>2</sup>	%	см <sup>2</sup>	%
Советская Гавань	255.6	203.9	80	53	20
Рудная Пристань	124.9	49.6	40	75.3	60
Преображение	140.7	56.2	40	84.5	60
Владивосток	171	68.7	40	102.3	60
Пусан	863.6	787.7	91	75.7	9
Нагасаки	4364	4216	97	134.9	3

В гистограммах суммарных колебаний выделяются отдельные столбцы (рис. 15). Это связано с усилением приливов и непериодических колебаний друг другом. При разложении на отдельные составляющие (рис. 16 и 17) такого эффекта не наблюдается. Распределение непериодических колебаний сравнивается с гауссовым распределением (рис. 15), потому что они являются стохастическим природным процессом, а распределение таких процессов стремится к нормальному. Наибольшее совпадение наблюдается в Пусане, хуже всего нормальное определение описывает гистограмму обеспеченности в Преображении и Владивостоке, что, возможно, связано с морфометрическими характеристиками бухт. Отдельные высокие столбцы гистограмм суммарных колебаний, вероятно, связаны со сместившимися пиками гистограмм непериодических колебаний. Во Владивостоке заметен незначительный пик для колебаний высотой около 10 см (рис. 17).

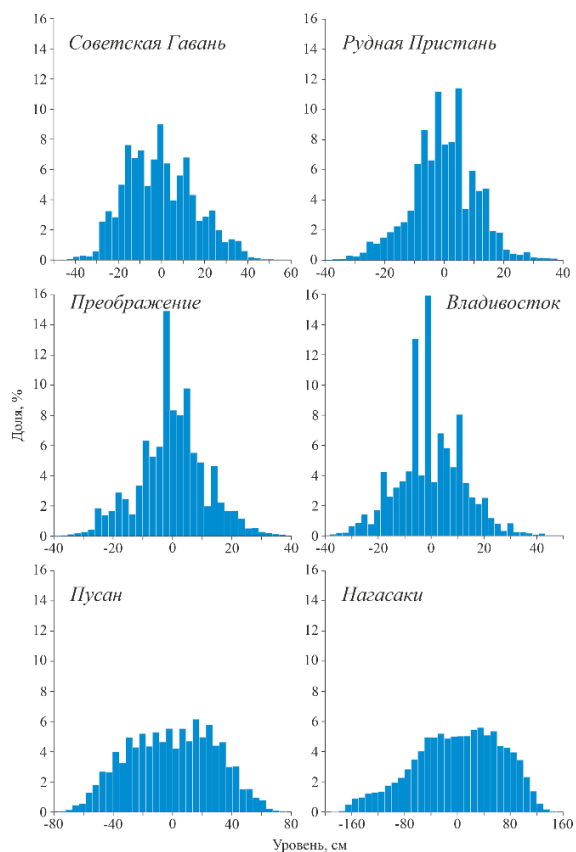


Рис. 15. Гистограммы обеспеченности суммарных колебаний относительно среднего уровня

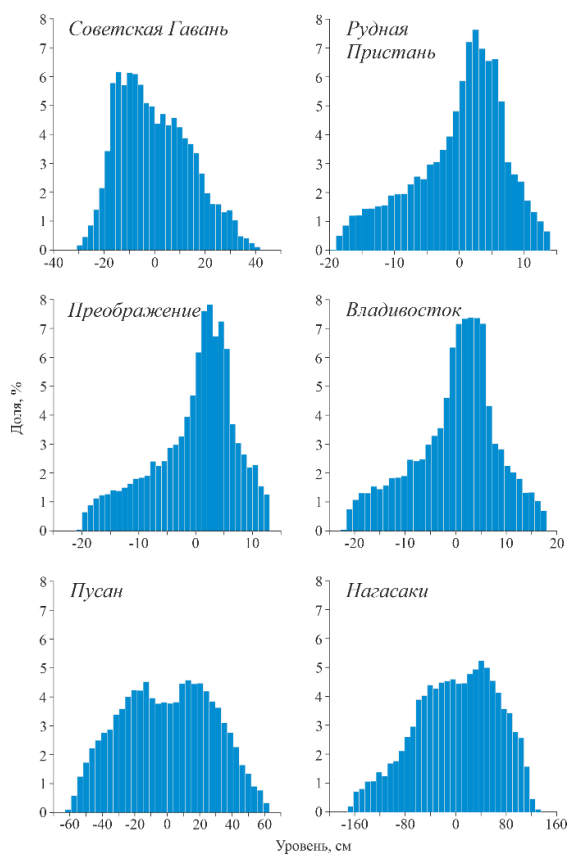


Рис. 16. Гистограммы обеспеченности приливных колебаний относительно среднего уровня

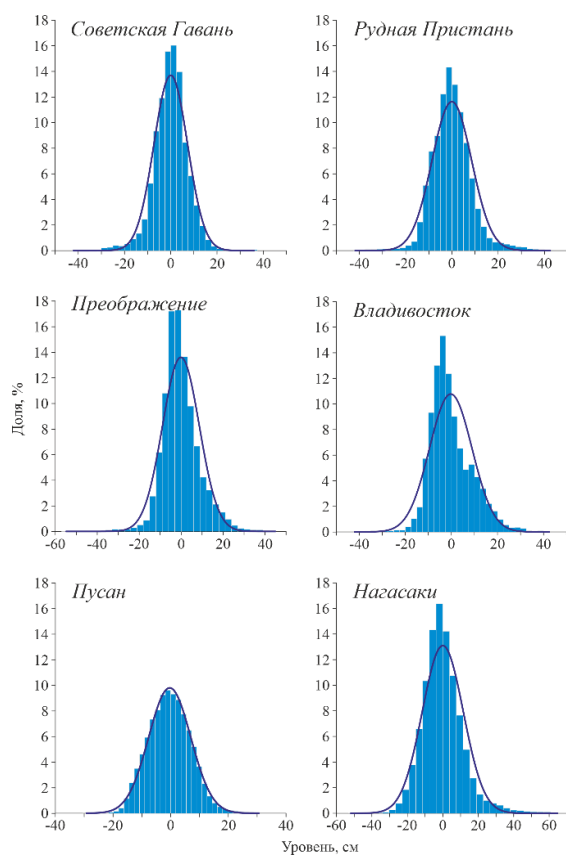


Рис. 17. Гистограммы обеспеченности неперiodических колебаний относительно среднего уровня

## Глава 6. Непериодические колебания уровня Японского моря, вызванные тайфунами Майсак и Хайшен

В данном исследовании проанализированы инфрагравитационные волны, проявляющиеся в виде прибойных биений, сейш и штормовых нагонов. Для них были рассчитаны высота над средним уровнем моря для каждой станции и размах от минимального до максимального значения (рис. 18).

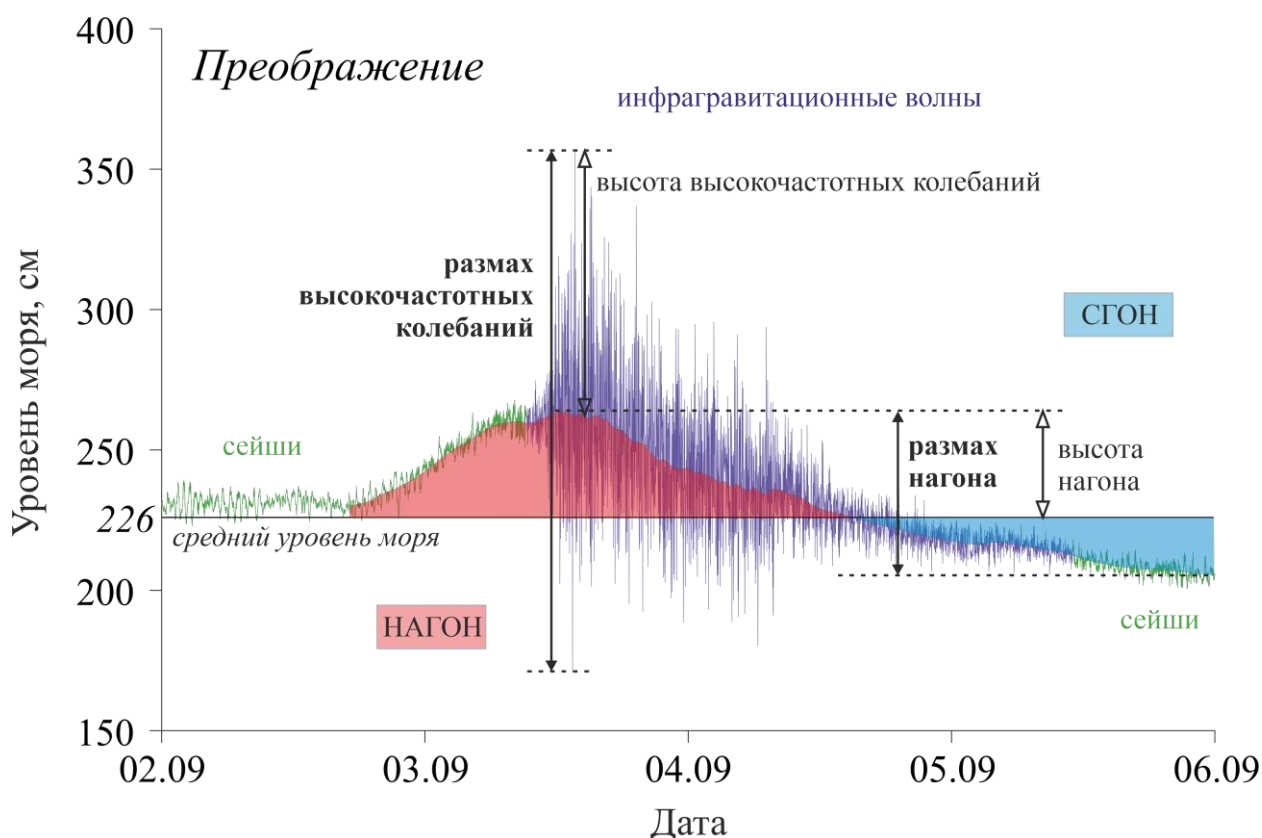


Рис. 18. Элементы неперидических колебаний уровня моря

В начале сентября 2020 г. над южной частью Японского моря прошли два тайфуна — Майсак и Хайшен (рис. 19). Первый сформировался 27.08 к востоку от Филиппинских островов в районе  $15^{\circ}$  с. ш.  $132^{\circ}$  в. д. Пик интенсивности пришелся на 01.09, когда циклон находился еще над Восточно-Китайским морем. Порывы ветра достигали 64 м/с [30]. Некоторые СМИ [31] называют Майсак самым сильным по скорости ветра тайфуном за последние 50 лет для акватории Японского моря. Хайшен образовался севернее, в 200 милях к востоку от Гуама 30.08. Максимум интенсивности он достиг 04.09 над Тихим океаном. Порывы ветра превышали 69 м/с [30]. К Японскому морю тайфун подошел относительно слабым, что уменьшило

возможный ущерб на побережье моря. Оба циклона прошли над Корейским проливом и восточной частью Корейского полуострова, то есть максимальное влияние на колебания уровня моря наблюдалось в Пусане и Нагасаки.

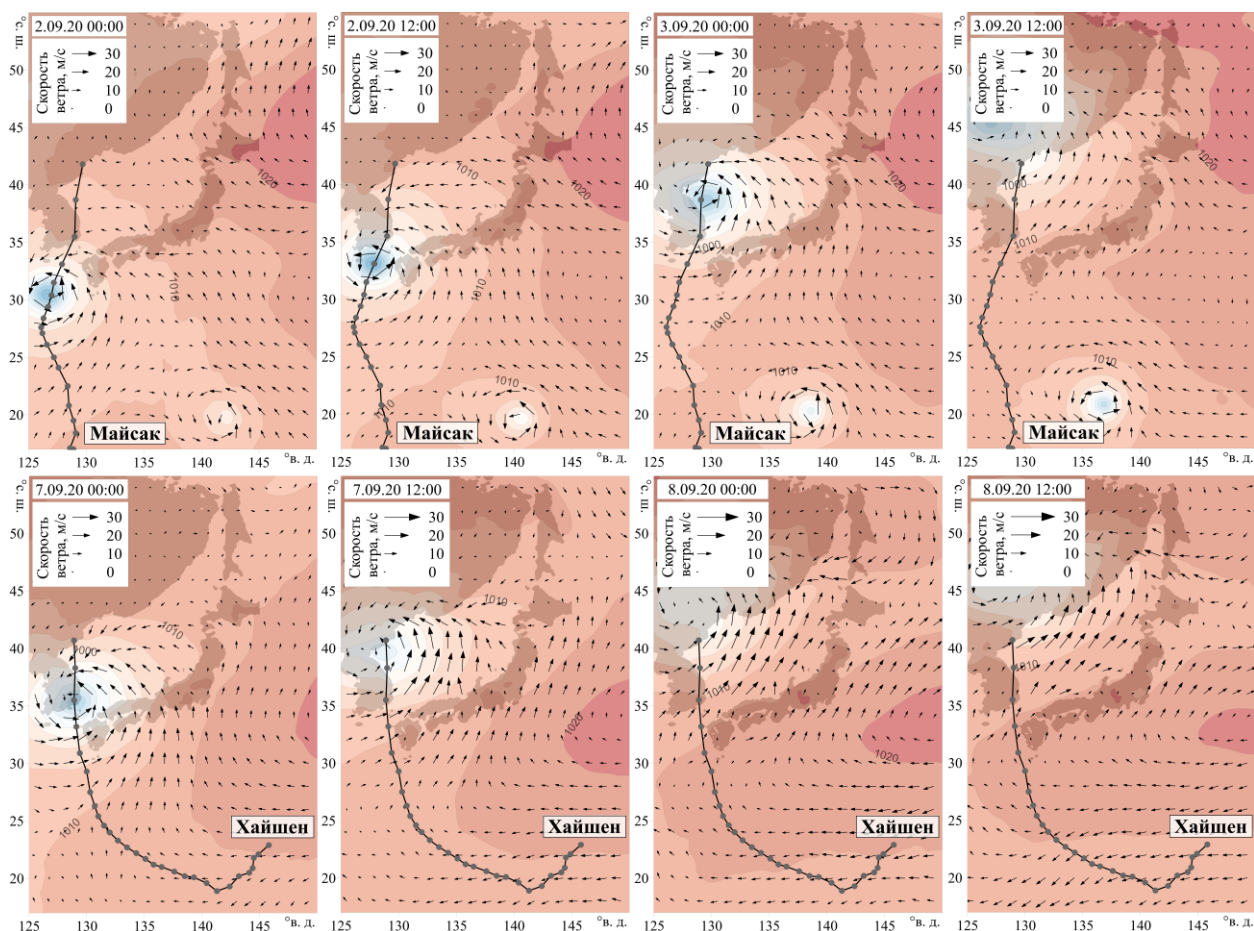


Рис. 19. Поля атмосферного давления и ветра с интервалом в 12 ч для тайфунов Майсак (02 – 03.09) — *вверху*, Хайшен (07 – 08.09) — *внизу*

Прохождение циклонов над анализируемыми пунктами нашло отражение в графиках изменения атмосферного давления и скорости ветра (рис. 20). Над Рудной Пристанью и Преображением хоть и зафиксировано понижение давления, но оно не опустилось ниже 1000 гПа. Влияние Хайшена оказалось сильнее для зарубежных станций. Это связано с тем, что тайфун практически диссипировал, дойдя до российского побережья. Атмосферное давление в Пусане и Нагасаки было ниже 980 гПа.

На всех графиках прохождение тайфунов сопровождается увеличением скорости ветра. Меньше всего это заметно в Рудной Пристани. В Преображении, а также в зарубежных пунктах, скорость ветра выше во время Хайшена. Она не превышает 15 м/с. Наибольшие значения зафиксированы во Владивостоке и



Пусане — более 25 м/с. Во Владивостоке анализируемым событиям предшествует несколько понижений значений давления с усилением ветра.

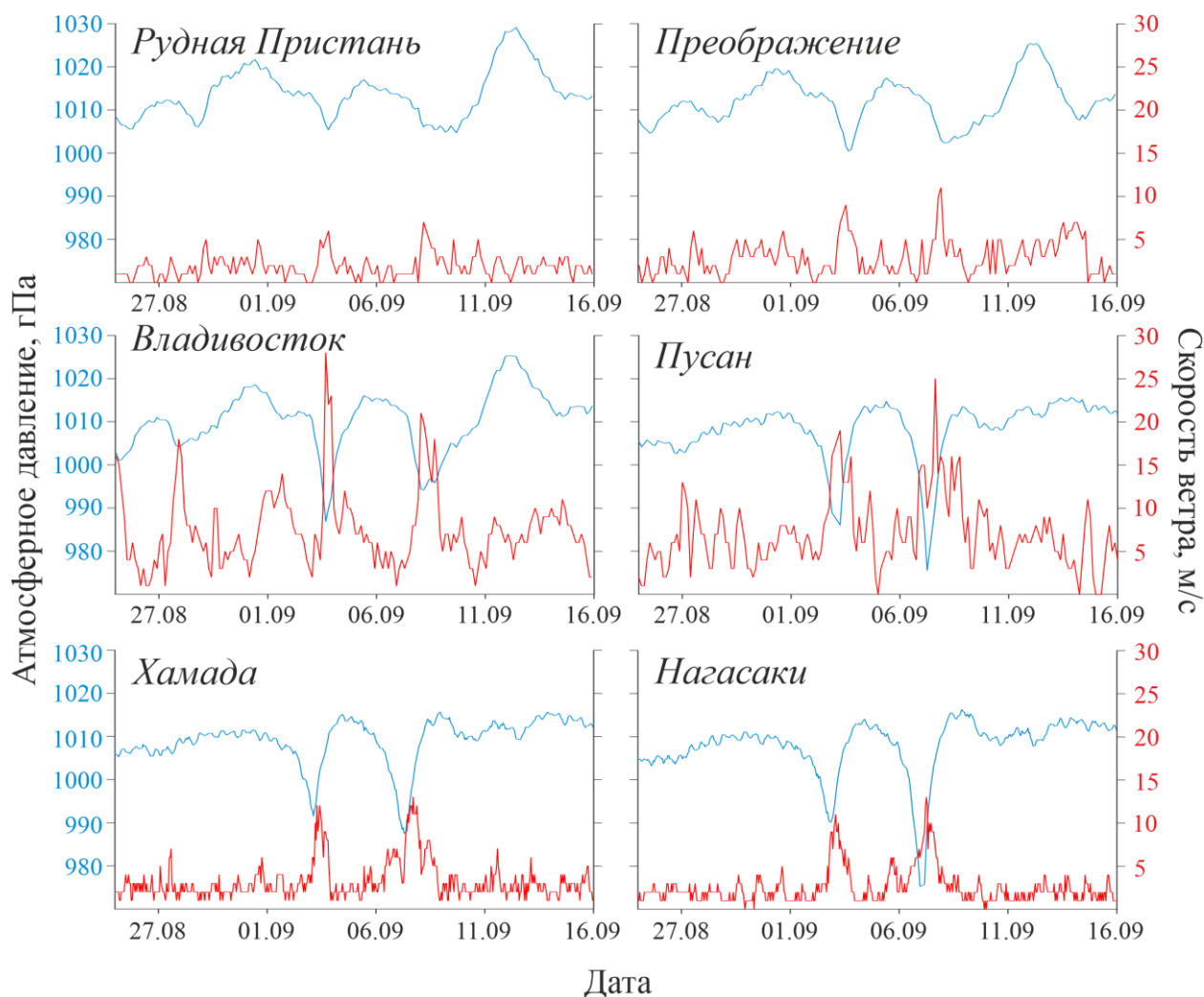


Рис. 20. Атмосферное давление (голубой) и скорость ветра (красный) над пунктами за период 25.08 – 16.09

Помимо атмосферных условий на характер колебаний в пунктах наблюдения влияют закрытость станции от волн открытого моря и морфометрические параметры бассейнов, а именно изрезанность береговой линии, рельеф дна в прибрежной зоне и форма бухт. Для упрощения анализа неперіодические колебания были разделены на низкочастотные (штормовые нагоны) и высокочастотные (сейши и инфрагравитационные волны).

Прошедшие тайфуны вне зависимости от расстояния пунктов до центра циклона вызвали штормовые нагоны, сейши и инфрагравитационные волны, которые были усилены или ослаблены приливами. Для анализа суммарных колебаний и их отдельных составляющих были сформированы таблицы их высот и

размахов отдельно для Майсака (01 – 04.09) и для Хайшена (05 – 08.09) (табл. 10 и 11). Разделение периодов влияния тайфунов на уровень моря произведено таким образом, что сгон перед нагоном от циклона Хайшен входит во второй отрезок времени. Это сделано для того, чтобы оценить максимальный размах колебаний уровня, вызванных этим циклоном.

Таблица 10. Высота и размах суммарных и непериодических (нагон и высокочастотные колебания) колебаний за период 01 – 04.09 (тайфун Майсак)

Пункт	Суммарные		Нагон		Высокочастотные	
	Высота, см	Размах, см	Высота, см	Размах, см	Высота, см	Размах, см
Советская Гавань	39	73	17	32	8	15
Сосуново	26	45	26	35	9	17
Рудная Пристань	50	75	28	37	29	71
Преображение	117	185	38	47	94	185
Находка	61	73	49	56	6	12
Владивосток	93	106	68	74	12	25
Посьет	95	102	76	80	6	11
Пусан	120	172	87	92	51	92
Сайго	36	52	33	36	9	17
Хамада	75	96	62	65	11	26
Нагасаки	165	293	56	63	18	34

Таблица 11. Высота и размах суммарных и непериодических (нагон и высокочастотные колебания) колебаний за период 05 – 08.09 (тайфун Хайшен)

Пункт	Суммарные		Нагон		Высокочастотные	
	Высота, см	Размах, см	Высота, см	Размах, см	Высота, см	Размах, см
Советская Гавань	29	77	12	48	7	14
Сосуново	31	71	18	54	9	18
Рудная Пристань	50	91	16	52	25	62
Преображение	116	167	18	52	83	145
Находка	42	77	22	57	6	12
Владивосток	46	84	31	67	9	18
Посьет	49	83	37	70	5	9
Пусан	107	163	74	81	38	76
Сайго	35	55	19	31	7	13
Хамада	48	90	35	60	13	29
Нагасаки	122	245	60	78	25	46

Максимальный диапазон изменения значений уровня моря для обоих периодов зафиксирован в Нагасаки (293 и 245 см соответственно). Хотя по максимальным

скоростям ветра тайфун Хайшен был сильнее, для 6 пунктов (Преображение, Владивосток, Посьет, Пусан, Хамада и Нагасаки) из 11 большой отклик поверхности моря вызвал Майсак. Второй циклон, проходя над акваторией Японского моря, был уже слабее первого. Высота суммарных колебаний превышала 1 м в 3 пунктах: Преображение, Пусан, Нагасаки, и не поднималась выше 0.5 м в Советской Гавани, Сосуново и Рудной Пристаней, находящихся относительно далеко от траектории перемещения циклонов.

Прежде чем перейти к анализу отдельных составляющих непериодических колебаний уровня моря, необходимо отметить, что вычитание приливов для Нагасаки произведено не полностью и что это следует принимать во внимание во время описания характера изменения уровня в этом пункте.

Размах нагонов во всех пунктах не превышает 1 м. Максимальные высоты и размахи низкочастотных колебаний зафиксированы в Пусане как для Майсака (87 и 92 см соответственно), так и для Хайшена (74 и 81 см соответственно). Наименьшие высота (17 см) и размах (32 см) первого нагона отмечается в Советской Гавани. Высота второго нагона минимальна также в Советской Гавани (12 см), однако по размаху ей уступает Сайго (31 см). Вероятно, это связано с предшествовавшим большим сгоном в северном пункте. По размаху второй нагон больше в Советской Гавани (разница 16 см), Сосуново (19 см), Рудной Пристаней (15 см), Преображении (5 см) и Нагасаки (15 см). В Находке они почти равны – разница составляет всего 1 см. Высота нагона от тайфуна Майсак более 0.5 м отмечается во Владивостоке (68 см), Посьете (76 см), Пусане (87 см), Хамаде (62 см) и Нагасаки (56 см), от тайфуна Хайшен – только в Пусане (74 см) и Нагасаки (60 см).

Характер низкочастотных колебаний различен в каждом пункте (рис. 21). Тем не менее можно выявить некоторые закономерности. На всех станциях, кроме Пусана и Нагасаки, второму нагону предшествует сгон от 12 (Сайго) до 36 см (Рудная Пристань, Владивосток). Это в некоторой степени уменьшило воздействие от тайфуна Хайшен.

Нагон от Майсака в некоторых пунктах (Владивосток, Посьет, Хамада, Пусан) имеет хорошо выраженный пик. В других (Советская Гавань, Сосуново, Рудная Пристань, Преображение, Сайго) график изменения уровня не имеет четкого пика и является довольно пологим. Особняком стоит Находка. Нагон в этом пункте не такой

плавный, как в предыдущей группе, но пик нагона плоский. Несколько иная картина в случае с нагоном от тайфуна Хайшен. Заметный пик второго нагона отмечается только в Хамаде и Пусане. Плоская вершина наблюдается не только в Находке, но и в Советской Гавани, Рудной Пристани, Преображении, Владивостоке, Сайго. О характере низкочастотных колебаний в Нагасаки сложно говорить при визуальном анализе из-за неполного вычитания приливов. Именно по этой причине на графике хорошо заметна периодичность колебаний.

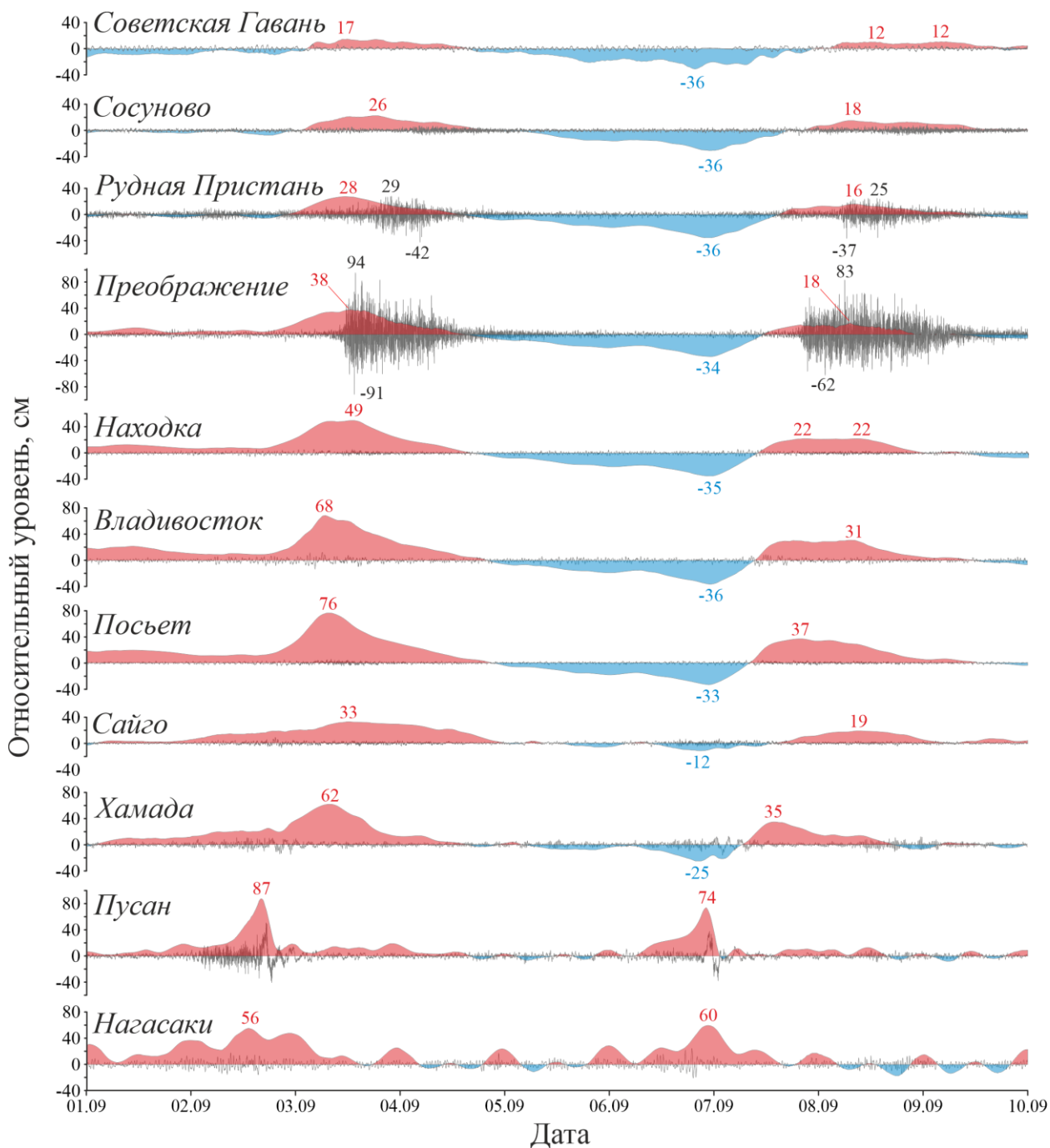


Рис. 21. Низкочастотные (заливка) и высокочастотные (серая линия) непериодические колебания

Высокочастотная составляющая непериодических колебаний разделяется на сейши, которые наблюдаются во всех бухтах, и инфрагравитационные волны, проявляющиеся в виде прибойных биений лишь в нескольких пунктах. Речь идет о Сосуново, Рудной Пристани, Преображении и Пусане. Статистические параметры прибойных биений в них различаются. В Сосуново прибойные биения, в отличие от 3-х других пунктов, где размах больше 0.6 м, идентифицировать невозможно. Определить их можно только визуально, о чем речь пойдет ниже. Можно только сказать, что они симметричны относительно среднего уровня. В Рудной Пристани соотношение высоты и размаха колебаний говорит об асимметричности относительно среднего уровня. В Преображении наблюдаются самые сильные прибойные биения (размах 185 и 145 см). Они практически симметричны относительно среднего уровня за период 01 – 04.09, но 05 – 08.09 меняют свой характер. В Пусане прибойные биения почти симметричны относительно среднего уровня, особенно за второй период.

Размах высокочастотных колебаний на остальных станциях не превышает 0.3 м, за исключением Нагасаки, причем после прохождения тайфуна Хайшен он был больше. Высота сейш составляет более 0.1 м за первый период во Владивостоке (12 см), Хамаде (11 см) и Нагасаки (18 см), за второй — в Хамаде (13 см) и Нагасаки (25 см).

На графиках сейши проявляются в виде незначительных колебаний на протяжении всего рассматриваемого периода. Характер прибойных биений индивидуален в 4 пунктах. В Сосуново инфрагравитационные волны возникают спустя некоторое время после достижения максимальных значений. В Рудной Пристани заметна асимметрия колебаний относительно среднего уровня. Инфрагравитационные волны сопровождают падение уровня после пика нагонов. В Преображении высота и размах прибойных биений увеличиваются больше, чем в 2 раза, но процесс аналогичен. Время существования инфрагравитационных волн на станции несколько дольше, чем в Рудной Пристани. Прибойные биения в Пусане кардинально отличаются не только от таковых в вышеперечисленных пунктах, но и друг от друга. Во время первого нагона инфрагравитационные волны сопровождали и подъем, и падение уровня. Во втором же — только спад. Причем после прохождения максимума нагонов уровень прибойных биений резко падает.

Увеличение размаха высокочастотных колебаний во время нагона от тайфуна Хайшен заметно в Нагасаки. Возможно, это сейши, которые раскачались сильнее обычного.

Чтобы отразить долю низко- и высокочастотной составляющих в суммарных колебаниях, были построены карта-схемы для двух циклонов, на которых размер кругов пропорционален размаху колебаний (рис. 22 и 23). В изменениях уровня во время прохождения тайфунов во всех пунктах, кроме Рудной Пристани и Преображения, преобладающее влияние принадлежит нагонам. В Пусане вклад низко- и высокочастотных колебаний сопоставим. В Нагасаки доля обеих составляющих относительно низка, что дает основания сделать вывод о существенной роли приливов.

Таким образом, по характеру нагонов и высокочастотных колебаний можно выделить 3 группы: Рудная Пристань и Преображение (значительные инфрагравитационные волны при падении уровня); Находка, Владивосток, Посьет, Хамада (длительные нагоны после тайфунов: первый — около 1.5 суток, второй — более 2-х суток; у нагона от Майсака хорошо выражен пик, кроме Находки, после Хайшена — нагон со сглаженным пиком, кроме Хамады); Советская Гавань, Сосуново, Сайго, Пусан и Нагасаки станции с характерными индивидуальными особенностями. В Советской Гавани, как и в Сосуново, наблюдаются небольшие нагоны длительностью 2 и 1.5 суток, однако в более южном пункте стгон сопровождается незначительными прибойными биениями, тогда как в более северном – высокочастотные колебания проявляются лишь в виде сейш. В Сайго первый нагон длится около 3-х суток, по значениям низкочастотных колебаний ниже только в Рудной Пристани. Пусан — единственная станция, где время подъема уровня во время нагона больше времени спада уровня. Нагоны от обоих тайфунов длятся менее суток. В Нагасаки сложно выделить нагон из-за неполного вычитания приливов и второй нагон выше первого в отличие от всех других станций. Инфрагравитационными волнами, в отличие от Рудной Пристани и Преображения, сопровождается увеличение уровня, а не уменьшение.

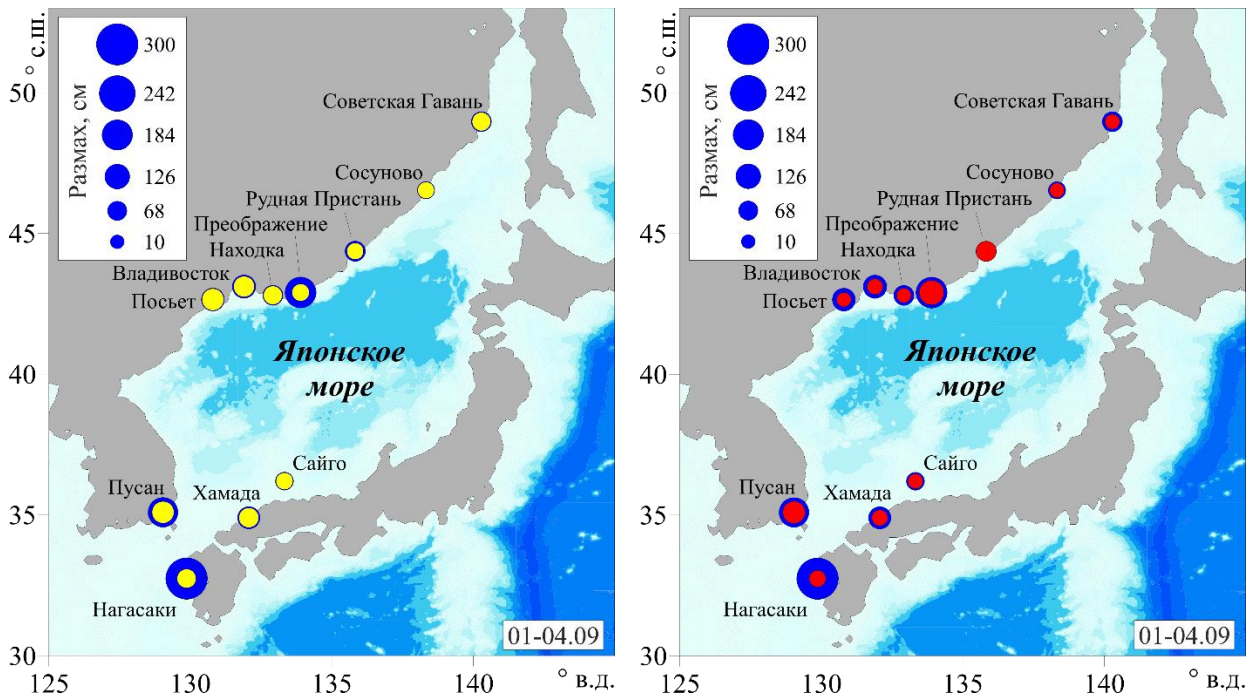


Рис. 22. Размах суммарных колебаний (синие круги), нагонов (желтые круги) и высокочастотных (красные круги) колебаний во время прохождения тайфуна Майсак

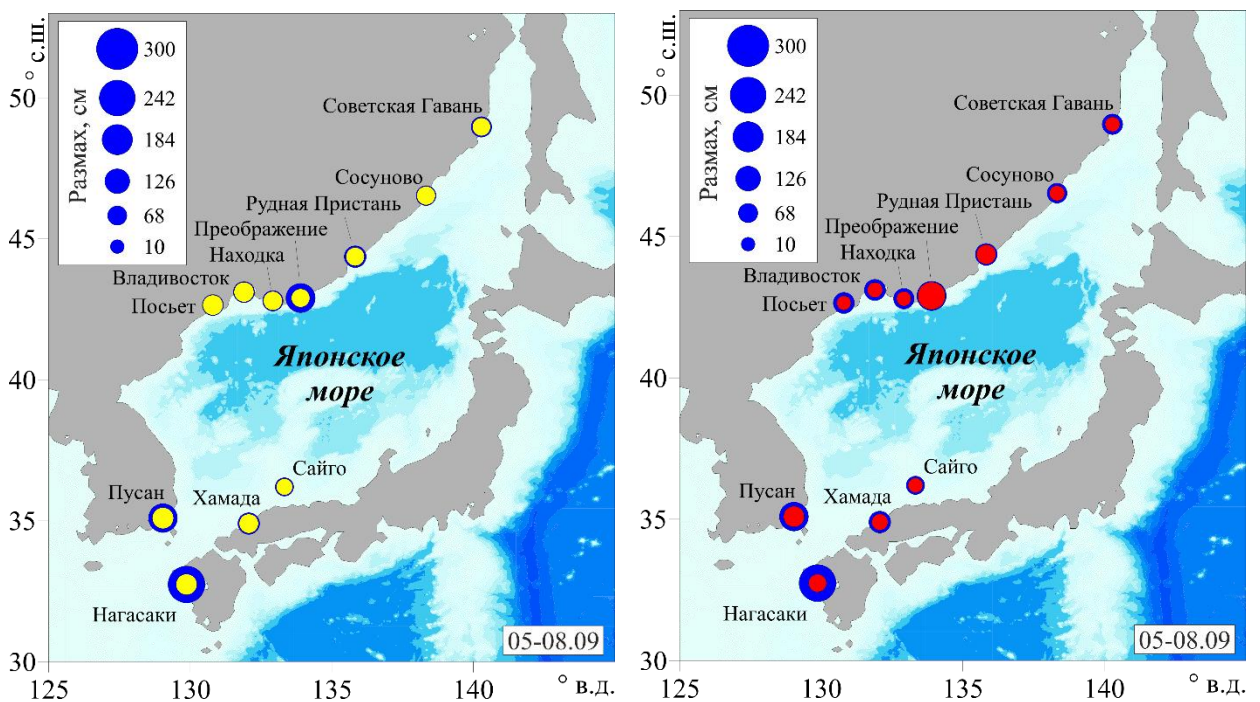


Рис. 23. Размах суммарных колебаний (синие круги), нагонов (желтые круги) и высокочастотных (красные круги) колебаний во время прохождения тайфуна Хайшен

## Глава 7. Спектральный анализ непериодических колебаний уровня моря

Спектральный анализ записей колебаний уровня моря позволяет определить распределение волновой энергии по различным частотным диапазонам и оценить частотно-избирательные свойства изучаемой акватории. Расчеты спектров выполнялись с помощью быстрого преобразования Фурье.

На рис. 24 представлены энергетические спектры для 10 станций за сутки: для Пусана и Нагасаки — за 2 и 7 сентября, для остальных — за 3 и 8 сентября, и для фоновых колебаний (11 – 19.06). Генеральный закон спада спектров —  $\omega^{-2}$ , где  $\omega$  — частота спектральной гармоники, обозначен на рис. 1 прямой линией и является типичным для спектров длинных волн в открытом океане [8].

По отношению к энергетическому спектру фоновых колебаний характер спектров во время нагонов меньше всего изменился в Советской Гавани, вероятно, как в самом удаленном от тайфунов пункте. Хорошо заметен энергетические пики волн с периодом 65, 23, 19, 15, 11 минут, соответствующие собственным колебаниям уровня моря — сейшам. Однако 3 сентября вместо максимумов с периодами 23 и 19 минут отмечается пик с периодом около 21 минуты. В диапазоне высокочастотных колебаний 08.09 выделяются незначительные максимумы с периодами 4 и 2 минуты.

В Сосуново 03.09 энергия в низкочастотном диапазоне выше энергии фоновых колебаний, в высокочастотном же (период менее 5 минут) — ниже. Во время второго нагона для волн с периодом менее 64.5 минут энергия больше, особенно для колебаний с частотой больше 6 цикл/час в час, что говорит об усилении высокочастотных колебаний во время прохождения Хайшена. Энергия диапазона волн с периодом 4 минуты и меньше изменяется в виде «белого шума».

В энергетических спектрах Рудной Пристани и Преображения прибойные биения проявляются в виде «белого шума» в диапазоне высоких частот (период менее 10 минут). Однако распределение энергии между волнами с более низкой частотой на станциях различается. Незначительные пики фоновых колебаний в Рудной Пристани имеют периоды 64.5 и 15 минут, однако 03.09 добавляется максимум с периодом 26 минут, а 15-минутный пик переходит в 14-минутный. Во время второго тайфуна максимум энергии приходится на волны с периодом 37.5 и



21.5 минуты. Наиболее заметные фоновые пики Рудной Пристани у высокочастотных колебаний с периодом 7.5 и 5 – 5.5 минут. В Преображении кривая энергии фоновых колебаний имеет другой вид. Хорошо заметно, что при отсутствии штормов значительная часть энергии приходится на сейши с периодом 32, 12.5 и 10 минут.

В Находке ситуация сложнее. Наиболее яркие энергетические максимумы наблюдаются для периодов 64.5 и 37 минут. Потом идет резкое падение энергии, а для волн с периодом менее 15 минут начинается плавное уменьшение. Во время прохождения тайфунов энергия вышеназванных пиков снижается, а начиная с периода 13 минут и меньше, превосходит фоновые колебания с несколькими отдельными пиками: 11, 8.5 и 6 минут. Причем между собой совпадают не все максимумы для 3 и 8 сентября. Для диапазона волн с периодом менее 4 минут колебания энергии представляют собой «белый шум».

Во Владивостоке характер колебания энергии во время прохождения тайфунов в целом совпадает с фоновыми колебаниями до периода 10 минут. Выделяются пики с периодом 43 и 12 минут. В высокочастотном диапазоне во время штормов появляются энергетические максимумы с периодами 8, 6, 5, 3 и 2.5 минуты. Форма энергетических кривых для обоих дней почти совпадает.

Пики энергии в Посъете имеют периоды 32 и 17 минут. Во время штормов они хорошо воспроизводятся (08.09 период последнего 16 минут). С приходом циклонов усиливаются максимумы с периодами 11, 9, 8 и 4 минуты. Для волн с периодом 5 минут и меньше спектральная плотность представляет «белый шум».

В Пусане характер фоновых и штормовых колебаний совпадет, различаются только значения. Основные энергетические пики имеют период 51, 21, 16, 7, 5 и 4 минуты. Для периодов меньше 3.5 минут колебание энергетической плотности происходит в виде «белого шума».

В Сайго расхождение фонового и штормовых спектров начинается для волн с периодом менее 5 минут. Единственный пик, которого нет 3 и 8 сентября, — с периодом 37 минут. Спектральная энергия остальных пиков, с периодами 32.5, 19, 10, 7 и 4 минуты, близка и по значениям. На станции Хамада наблюдается схожее частотное распределение энергии.

В Нагасаки наибольшие различия проявляются для волн с периодом менее 8 минут, особенно во время первого тайфуна. Энергия высокочастотных волн с периодом 4.5 минуты и меньше изменяется в виде «белого шума». Основные энергетические максимумы имеют периоды около 38, 21, 14, 10 и 8 минут.

Энергия волн, вызванных тайфуном Майсак, больше по сравнению с тайфуном Хайшен в 6 пунктах: Находке, Владивостоке, Посъете, Пусане, Сайго, Хамаде и Нагасаки. «Белый шум» в энергетических спектрах наблюдается для 8 станций: Сосуново, Рудная Пристань, Преображение, Находка, Посъет, Пусан, Сайго, Нагасаки.

Помимо построения энергетических спектров был проведен спектрально-временной анализ (СВАН) для тех же 10 пунктов. По рис. 25 хорошо видно, что основную часть энергии несут волны с периодом от 20 до 120 минут в Советской Гавани, Находке, Владивостоке и Нагасаки. В Сосуново, Рудной Пристане и Преображении бóльшая часть возбужденных колебаний приходится на прибойные биения. В низкочастотной области СВАН-диаграмм для этих станций энергия колебаний уровня существенно ниже. В Посъете, Пусане и Сайго во время прохождения циклонов значительно увеличивается высокочастотная (период менее 10 минут) составляющая.

В дополнение к энергетическим спектрам были построены функция источника, показывающая силу штормовых колебаний относительно фоновых, и топографическая передаточная функция, характеризующая трансформацию сигнала при его подходе к станции (рис. 26) [26].

Функция источника представляет собой отношение спектров, рассчитанных для 2, 3, 7 и 8 сентября, к фоновому спектру. Она показывает усиление волн определенной частоты во время шторма, то есть при значении больше 1 (пунктирная линия) энергия во время прохождения тайфунов на данной частоте превосходит энергию фоновых волн [26].

Колебания с периодом 9 минут и менее увеличиваются только тайфуном Майсак во Владивостоке и Нагасаки; только тайфуном Хайшен — в Сосуново; обоими штормами — Рудной Пристане, Преображении, Находке, Посъете и Сайго.

С низкочастотными колебаниями ситуация сложнее. В Советской Гавани, Сосуново и Рудной Пристане во время прохождения двух циклонов усиливаются

волны разных периодов и характер графиков различается. В Преображении, Посьете, Пусане и Нагасаки пики практически совпадают по частоте, за некоторыми исключениями.

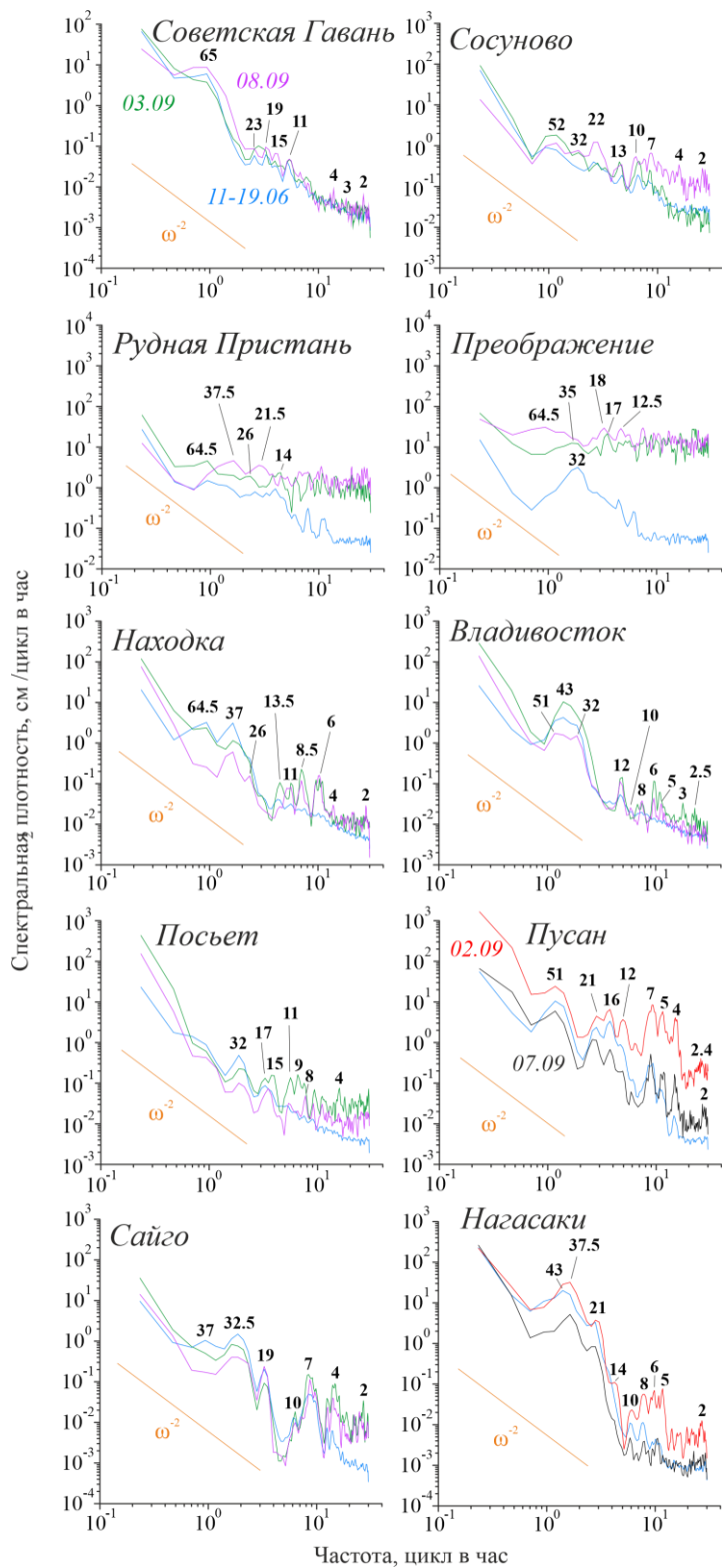


Рис. 24 (слева). Энергетические спектры для фоновых колебаний (голубой), 02.09 (красный), 03.09 (зеленый), 07.09 (черный), 08.09 (фиолетовый), цифрами – период в минутах

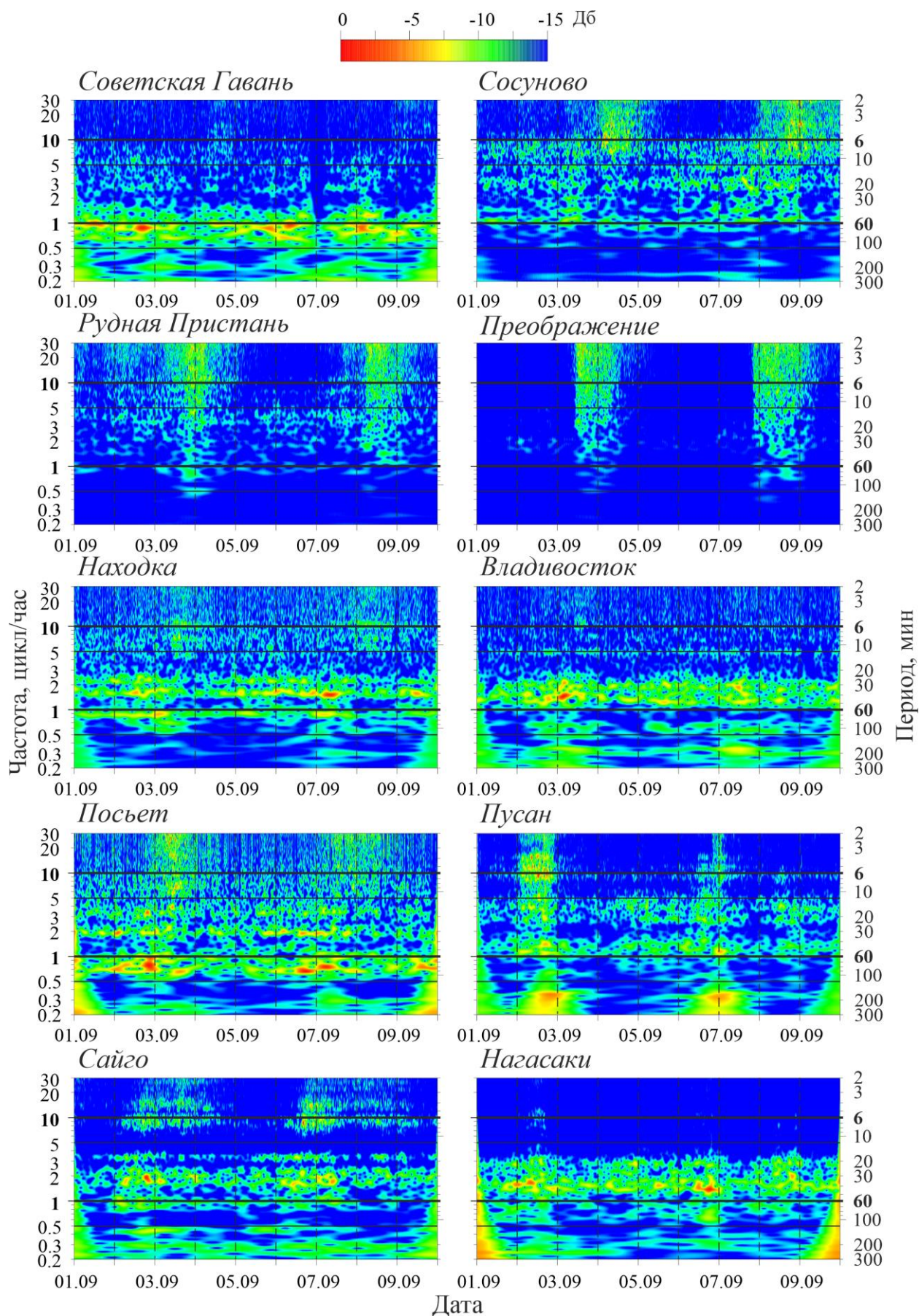


Рис. 25 (справа). Спектрально-временной анализ (для Сосуново, Посьета и Сайго минимум -12 Дб)

В разных пунктах тайфуны не только усилили волны определенного периода, но и ослабили. Так, Майсак уменьшил колебания в Советской Гавани для периодов 48 – 97 минут, в Сосуново — меньше 5 минут, в Находке — 15 – 86 минут, в Посъете — 28 – 86 минут, в Сайго — 8 – 86 минут. Хайшен ослабил воздействие на берег волн в Советской Гавани с периодом 130 и больше минут, в Сосуново — более 67 минут, в Рудной Пристани — более 86 минут, в Находке — 13 – 120 минут, во Владивостоке — 23 – 80 минут, в Посъете — 12 – 100 минут, в Пусане — 7 – 75 минут, в Сайго — 7 – 120 минут, в Нагасаки — 5.5 – 128 минут. Усиливаются волны во всем частотном диапазоне во время обоих событий только в Преображении.

Таким образом, тайфуны увеличили в основном высокочастотные колебания, однако в Сосуново, Пусане, Сайго и Нагасаки наблюдалось и уменьшение энергии от них. На некоторых станциях отмечено ослабление сейш во время штормов.

Топографическая передаточная функция — это отношение энергии фоновых колебаний к  $\omega^2$ . Она отражает индивидуальные резонансные свойства каждого пункта, иными словами, влияние топографии на приходящую из открытого моря волну.

Высокочастотные колебания с периодами 2 – 15 минут связаны, как правило, с собственными колебаниями маленьких локальных бухт [26].

Больше всего они усиливаются в Сосуново, Рудной Пристани и Преображении, пунктах, где наблюдаются прибойные биения. Особенно резкий скачок отмечается для волн с периодом менее 7 минут. Также в Рудной Пристани есть два острых пика с периодами 7.5 и 5.5 минут, в Преображении — 14 и 9.5 минут. В другом пункте, где зафиксированы инфрагравитационные волны, Пусане, график имеет пилообразный характер. Ярко выделяется пик с периодом колебаний 6.5 минут. Другие максимумы имеют периоды 5.5, 4 и 2 минуты, но они малы по сравнению с ним. В Советской Гавани, Находке, Владивостоке, Посъете и Пусане в самой правой части спектра по мере уменьшения периода график в целом возрастает.

Более низкочастотные колебания с периодом 20 – 130 минут связаны с сейшами более крупных заливов и шельфовым резонансом [26]. В этом диапазоне частот в Советской Гавани и Преображении наблюдается только один яркий максимум — с периодом 64.5 и 31.5 минута соответственно. В Сосуново и Посъете пиков

несколько, но они незначительны. В Рудной Пристани низкочастотных максимумов не наблюдается. В Находке усиливаются волны двух периодов: 64.5 и 37 минут, как и в Сайго — 32 и 18 минут. Во Владивостоке и Нагасаки наблюдается «горб» с двумя вершинами — 43 и 31.5 минут и 37 и 21 минута соответственно. В Пусане значительно трансформируются волны с периодами 43.5 и 16 минут.

Таким образом, в Сосуново, Рудной Пристани и Преображении больше усиливаются высокочастотные волны, в Советской Гавани, Находке, Владивостоке и Посьете — колебания с периодом более 30 минут, в Пусане и Нагасаки — волны как с низкими частотами, так и близкими к высоким (период 15 минут и меньше).

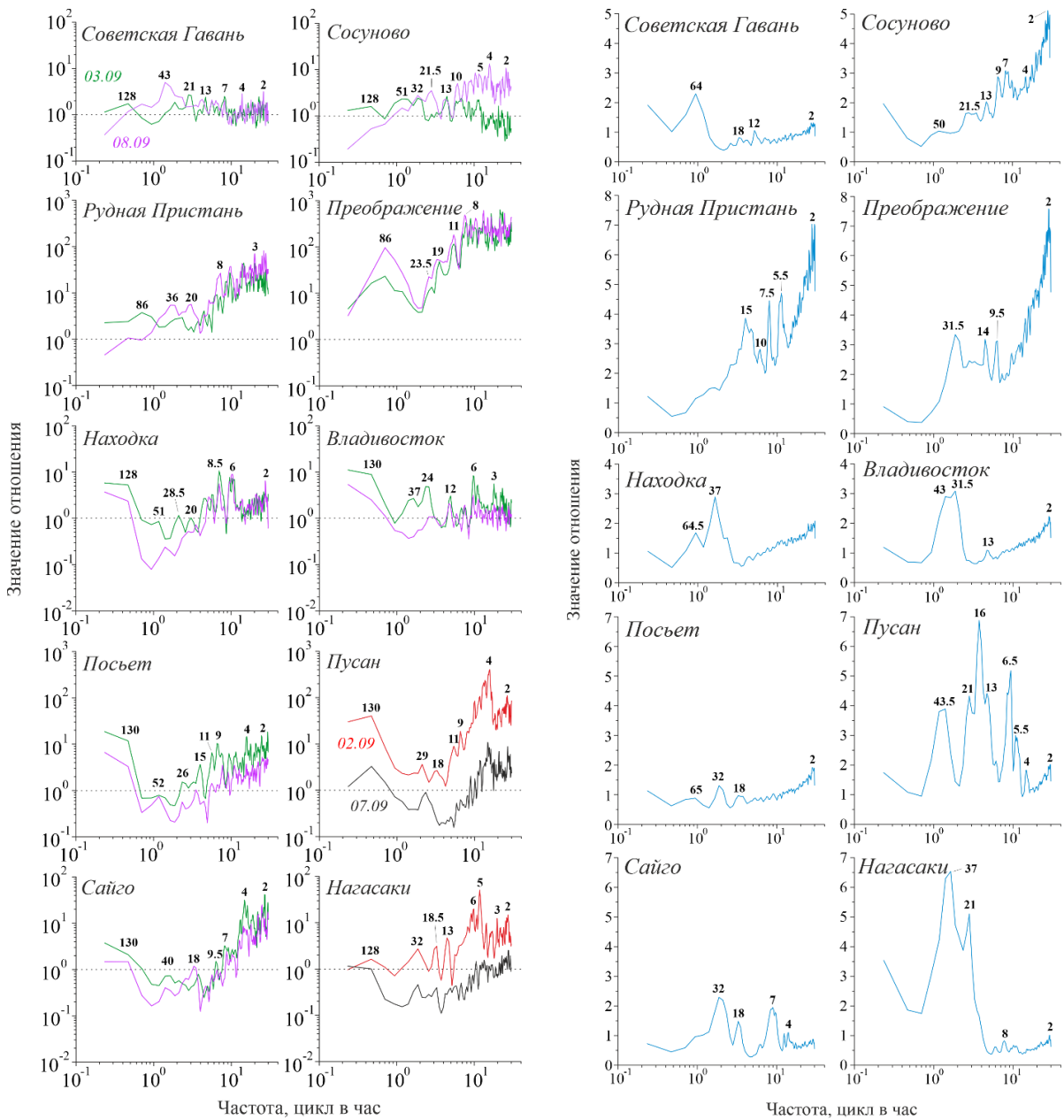


Рис. 26. Функция источника для 02.09 (красный), 03.09 (зеленый), 07.09 (черный), 08.09 (фиолетовый) — слева и топографическая передаточная функция — справа (цифры — период в минутах)

## Глава 8. Влияние высоты ветровых волн на дисперсию колебаний уровня

По результатам статистической и визуальной оценки непериодических колебаний было выдвинуто предположение, что в 4 пунктах наблюдаются прибойные биения. Чтобы более детально изучить эти высокочастотные волны и проверить их связь с ветровым волнением, были рассмотрены взаимные характеристики стандартного отклонения высокочастотных колебаний и значительной высоты ветровых волн, взятой из реанализа ERA5: поля коэффициентов корреляции (модуль коэффициента корреляции) (рис. 27), графики хода (рис. 28) и диаграммы рассеяния (рис. 29).

Для первого этапа анализа (рис. 27) был посчитан коэффициент корреляции ( $R$ ) для узлов с шагом  $0.5^\circ$  в акватории вблизи станций. Наибольшие значения, как и ожидалось, получены для Преображения (0.86) и Рудной Пристани (0.83). Причем узел с максимальным  $R$  в первом случае не является ближайшим к станции. Преображение отделено от него мысом, что следует учитывать при дальнейшем анализе. В Рудной Пристани узел с наибольшим значением — один из ближайших. В Пусане максимальный коэффициент корреляции составляет всего 0.54, и расположена эта точка (узел) на противоположной стороне Корейского пролива. Самый низкий  $R$  из рассматриваемых станций рассчитан для Сосуново (0.42). Узел расположен недалеко от пункта. Результаты анализа показывают, что для оценки влияния ветрового волнения нужно использовать не ближайший к пункту наблюдений узел реанализа, а поле высоты ветровых волн в ближайшей части акватории моря. Возможно инфрагравитационные волны, приводящие к существенным прибойным биениям на прибрежных станциях, образуются на некотором отдалении от берега и уже распространяются в сторону побережья.

Для проверки гипотезы о прибойных биениях было рассчитано поле коэффициентов корреляции для станции, где точно не зафиксированы инфрагравитационные волны — для Находки. Максимальный коэффициент корреляции в этом случае составил всего 0.14.

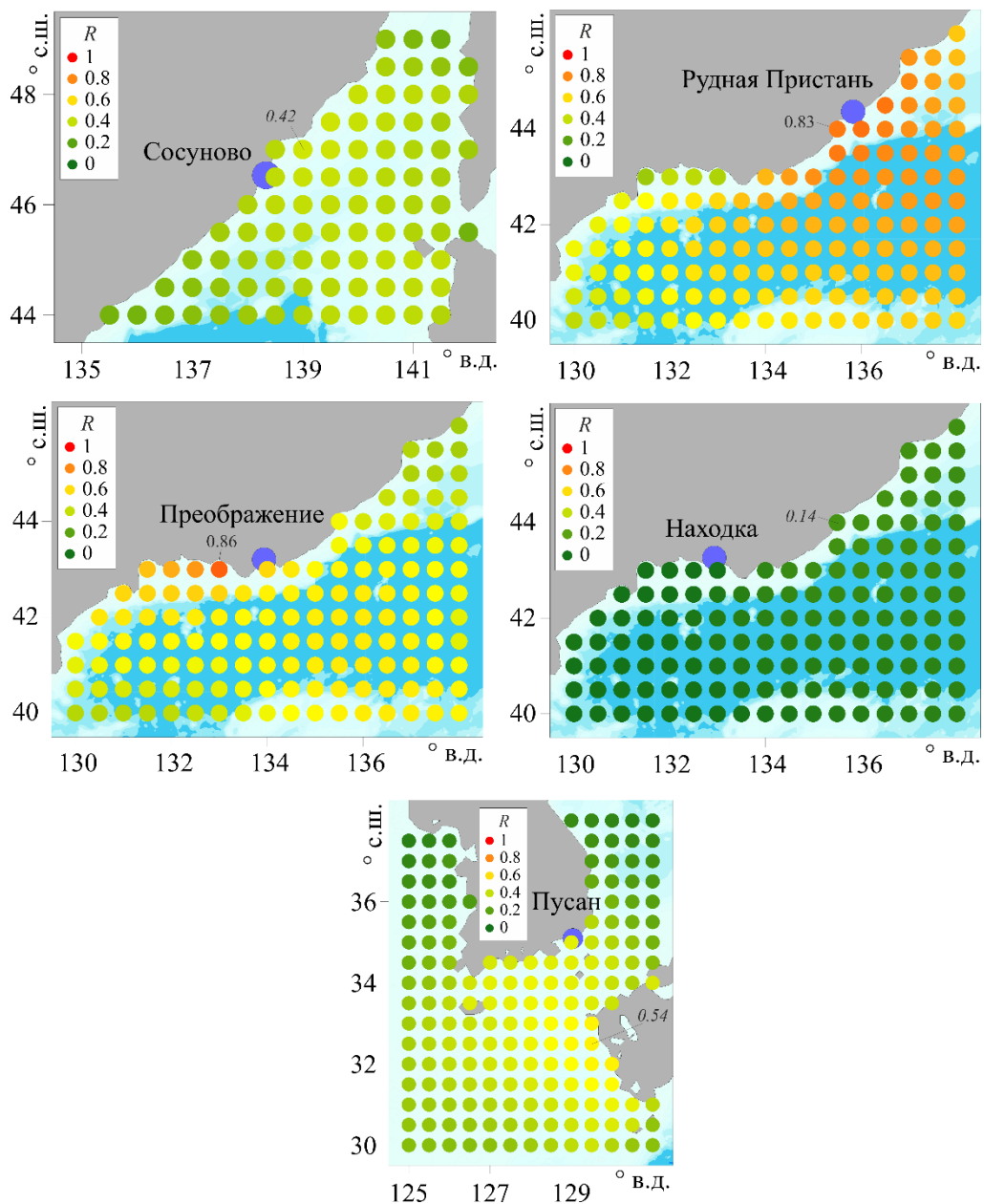


Рис. 27. Значения коэффициента корреляции ( $R$ ) по модулю в узлах сетки с шагом  $0.5^\circ$  между стандартным отклонением высокочастотных колебаний и высотой ветровых волн по результатам реанализа ERA5 за период 01.06 – 16.09. ( $R$  взят по модулю)

Характер графиков стандартного отклонения высокочастотных колебаний и значительной высоты ветровых волн различается в каждом пункте (рис. 28). Так, в Сосуново некоторые экстремумы относительно точно совпадают по времени, однако большая часть практически не соотносится. В Рудной Пристани и Пусане хорошо соотносятся большие значения обоих параметров в отличие от фоновых колебаний. В Преображении только в начале июня заметно несовпадение колебаний стандартного отклонения и высоты волны.



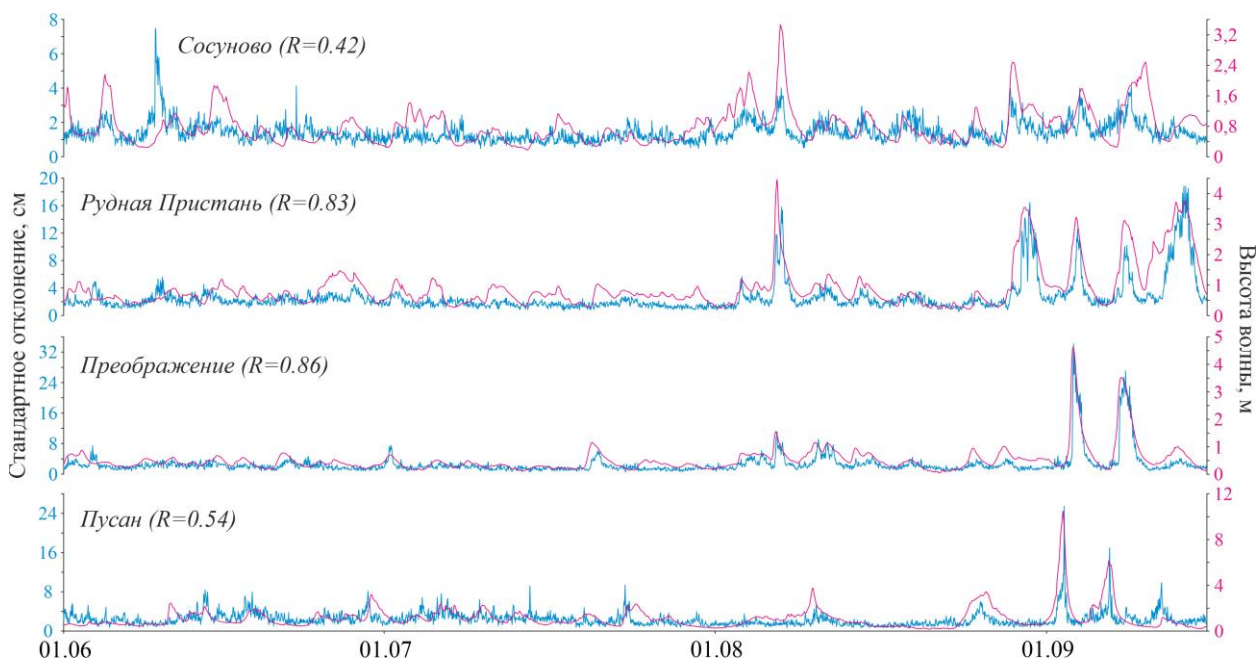


Рис. 28. Ход стандартного отклонения высокочастотных колебаний (голубой) и высоты ветровых волн по результатам реанализа ERA5 (розовый) за период 01.06 – 16.09

Для станций с наибольшими коэффициентами корреляции (Рудной Пристани и Преображения) построены диаграммы рассеяния для всего периода исследования. Для них также посчитан коэффициент детерминации  $R^2$ , который показывает долю влияния стандартного отклонения высокочастотных колебаний на изменение высоты ветровых волн. В Преображении он немного больше (0.74, разница 0.05).

В Рудной Пристани фоновые колебания распределены по практически половине области диаграммы (рис. 29). Колебания от тайфуна Майсак сконцентрированы вдоль участка линии, описываемой линейным уравнением регрессии, и чуть выше него. Скопление точек для обоих циклонов имеет дугообразную форму. Колебания от тайфуна Хайшен лежат выше линии, описываемой линейным уравнением регрессии. Форма скопления точек, характеризующих колебания уровня во время прохождения циклонов, говорит о нелинейном отклике инфрагравитационных волн на изменение значительной высоты ветровых волн. Так, приблизительно до высоты ветровых волн 1.8 м наблюдается слабое возбуждение прибойных биений. Когда высота превышает эту отметку, нелинейное взаимодействие ветровых волн образует инфрагравитационные волны. Логарифмическое же уравнение регрессии гораздо

лучше описывает распределение зависимости наличия инфрагравитационных волн от значительной высоты ветровых.

В Преображении распределение точек имеет другой характер. Фоновые колебания сосредоточены в нижней части линии тренда. Вдоль нее расположены точки тайфунов, причем зеленые точки скучены у определенной верхней границы и выше не поднимаются. Красной и зеленой областью обозначены колебания, выбивающиеся из общей закономерности. Стоит отметить, что разница по времени между точками в двух вершинах в обоих случаях 8 часов. Вероятно, это связано как раз с тем, что Преобразование от точки с наибольшим коэффициентом корреляции отделено мысом.

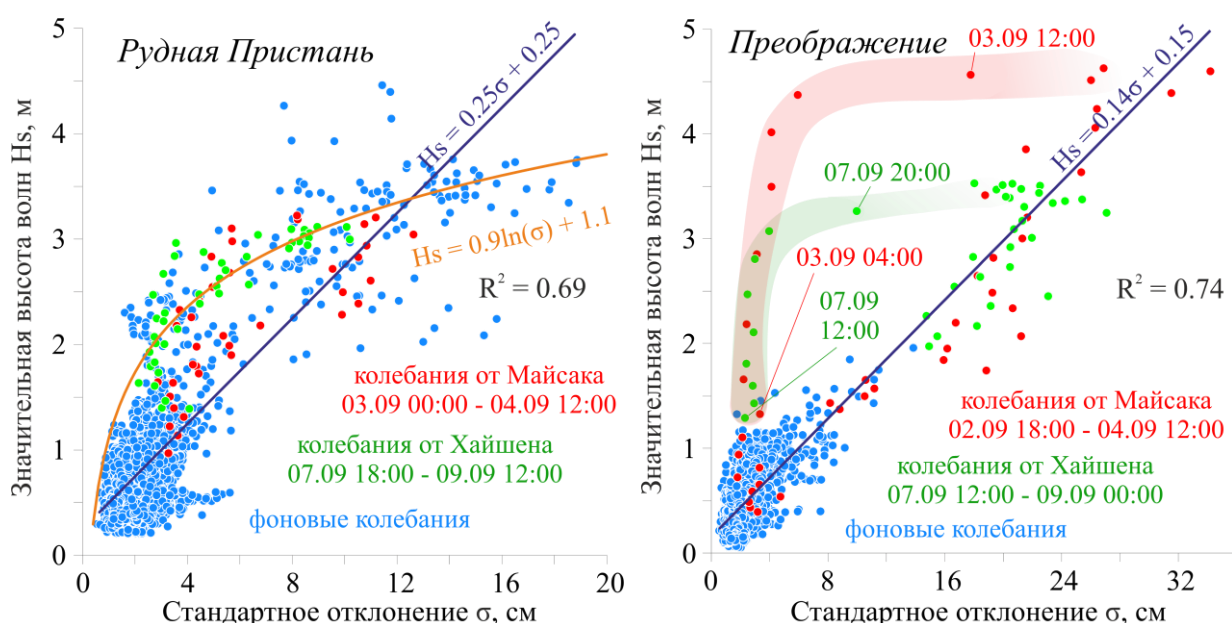


Рис. 29. Диаграмма рассеяния для Рудной Пристани (слева) и Преображения (справа) (красные круги – период нагона от тайфуна Майсак, зеленые круги – период нагона от тайфуна Хайшен, синие круги – остальные дни,  $R^2$  – коэффициент детерминации, фиолетовая и оранжевая линии – графики уравнений регрессии, красная область – отклонение от графиков уравнений регрессий колебаний от тайфуна Майсак, зеленая область – отклонение от графиков уравнений регрессий колебаний от тайфуна Хайшен)

Таким образом, для Сосуново и Пусана связь между высокочастотными колебаниями и ветровыми волнами оказалась не такой значительной, как для Рудной Пристани и Преображения. В силу особенностей рельефа дна и формы береговой линии в каждом пункте инфрагравитационные волны имеют свой характер.

## Выводы

Разносторонний анализ данных (о колебаниях уровня моря, скорости ветра и давлении, результатов реанализа) позволил изучить закономерности отклика уровня поверхности Японского моря на прохождение тайфунов Майсак и Хайшен и сделать некоторые выводы относительно характера колебаний уровня. Ряды отметок уровня моря можно назвать практически непрерывными. Наибольшее количество пропусков зафиксировано в Советской Гавани (1.67%). Они были заполнены с помощью линейной интерполяции.

Прохождение тайфунов над исследуемым районом проявилось в понижении давления и усилении скорости ветра во всех анализируемых пунктах.

В пределах акватории Японского моря наблюдаются правильные полусуточные (Пусан), неправильные полусуточные (Нагасаки, Посьет, Владивосток, Находка, Преображение, Рудная Пристань, Советская Гавань) и неправильные суточные (Хамада, Сайго, Сосуново) приливы. Самый высокий сизигийный прилив наблюдается в Нагасаки, а самый низкий — в Сосуново. Максимальная величина прилива в Нагасаки более, чем в 2.5 раза, выше, чем во втором по высоте приливов пункте — в Пусане. Наибольшее значение в колебаниях уровня приливы играют в Нагасаки (97%).

По мере выделения отдельных составляющих из суммарных рядов колебаний проводился статистический анализ. Были посчитаны максимальные и минимальные отметки уровня относительно среднего за 3.5 месяца, медиану и стандартное отклонение. Максимальный размах суммарных колебаний зафиксирован в Нагасаки, тогда как остаточных — в Преображении. Также Нагасаки — единственный пункт, где минимальное значение относительно среднего уровня больше по модулю, чем максимальное. На этой же станции зафиксировано максимальное стандартное отклонение из-за значительной роли приливов. При сравнении значений среднего и медианы была выявлена незначительная разница (1 – 5 см) из-за асимметричности подъема и падения уровня моря.

Наиболее наглядным для выявления характера колебаний уровня оказался визуальный анализ. Он показал, что во всех пунктах, кроме Пусана и Нагасаки, второму штормовому нагону предшествовал сгон, что заметно снизило

максимальные значения уровня моря во время Хайшена. По максимальным скоростям ветра он был сильнее, однако для 6 пунктов (Преображение, Владивосток, Посьет, Пусан, Хамада и Нагасаки) из 11 большой отклик поверхности моря вызвал Майсак. Размах нагонов во всех пунктах не превышает 1 м. Максимальные высоты и размахи низкочастотных колебаний зафиксированы в Пусане как для Майсака, так и для Хайшена. Наименьшие высота и размах первого нагона отмечается в Советской Гавани. Высота второго нагона минимальна также в Советской Гавани, однако по размаху ей уступает Сайго. Характер низкочастотных колебаний различен в каждом пункте. Нагон в некоторых пунктах имеет хорошо выраженный пик, в других — график изменения уровня не имеет четкого пика и является довольно пологим, в третьих — он не такой плавный, но пик плоский.

Инфразгравитационные волны зафиксированы в Пусане, Преображении, Рудной Пристаней и Сосуново. По статистическому анализу в Сосуново прибойные биения, в отличие от 3-х других пунктов, где размах больше 0.6 м, идентифицировать невозможно, только с помощью визуального и спектрального анализов. Размах высокочастотных колебаний на остальных станциях не превышает 0.3 м, за исключением Нагасаки, причем после прохождения тайфуна Хайшен он был больше. В Сосуново инфразгравитационные волны возникают спустя некоторое время после достижения максимальных значений. В Рудной Пристаней заметна колебания асимметричны относительно среднего уровня и сопровождают падение уровня после пика нагонов. В Преображении высота и размах прибойных биений увеличиваются больше, чем в 2 раза, но характер колебаний аналогичен. Время существования инфразгравитационных волн на станции несколько дольше, чем в Рудной Пристаней. Прибойные биения в Пусане кардинально отличаются не только от таковых в вышеперечисленных пунктах, но и друг от друга. Во время первого нагона инфразгравитационные волны сопровождали и подъем, и падение уровня. Во втором же — только спад. Причем после прохождения максимума нагонов уровень прибойных биений резко падает. По характеру нагонов и высокочастотных колебаний можно выделить 3 группы: Рудная Пристань и Преображение; Находка, Владивосток, Посьет, Хамада; Советская Гавань, Сосуново, Сайго, Пусан и Нагасаки станции с характерными индивидуальными особенностями. В изменениях уровня во

время прохождения тайфунов во всех пунктах, кроме Рудной Пристани и Преображения, преобладающее влияние принадлежит нагонам.

Спектральный и спектрально-временной анализы позволили отследить распределение волновой энергии по частотному диапазону. Характер энергетических спектров во время нагонов меньше всего изменился в Советской Гавани. Энергия волн, вызванных тайфуном Майсак, больше по сравнению с тайфуном Хайшен в 6 пунктах: Находке, Владивостоке, Посъете, Пусане, Сайго, Хамаде и Нагасаки. «Белый шум» в энергетических спектрах наблюдается для 8 станций: Сосуново, Рудная Пристань, Преображение, Находка, Посъет, Пусан, Сайго, Нагасаки. Благодаря функции источника было выяснено, что в разных пунктах тайфуны не только усилили волны определенного периода, но и ослабили (Сосуново, Пусане, Сайго и Нагасаки). В Сосуново, Рудной Пристани и Преображении больше усиливаются высокочастотные волны, в Советской Гавани, Находке, Владивостоке и Посъете — колебания с периодом более 30 минут, в Пусане и Нагасаки — волны как с низкими частотами, так и близкими к высоким.

По результатам более детального анализа взаимодействия ветровых и инфрагравитационных волн получились следующие результаты. Максимальный коэффициент корреляции между стандартным отклонением высокочастотных колебаний и значительной высотой ветровых волн посчитан для Рудной Пристани и Преображения (более 0.8). В Пусане и Сосуново значения меньше. В Сосуново и Рудной Пристани узел с максимальным коэффициентом корреляции ближайший. Характер графиков стандартного отклонения высокочастотных колебаний и значительной высоты ветровых волн различается в каждом пункте. Распределение точек на диаграммах рассеяния для Преображения и Рудной Пристани имеет разный вид. В силу особенностей рельефа дна и формы береговой линии в каждом пункте инфрагравитационные волны имеют свой характер.

## Заключение

В результате исследования были выявлены характерные особенности колебания уровня Японского моря в 11 пунктах после прохождения тайфунов Майсак и Хайшен в начале сентября 2020 г. с помощью различных анализов: гармонического, статистического, визуального и спектрального.

Из суммарных колебаний уровня моря была вычтена и проанализирована приливная составляющая. Результаты гармонического и статистического анализов показали, что в Советской Гавани, Пусане и Нагасаки преобладают полусуточные приливы. Оставшаяся непериодическая составляющая была разделена на штормовые нагоны (низкочастотные волны), сейши и инфрагравитационные волны. В зависимости от конфигурации берега, рельефа дна и морфометрических параметров заливов низкочастотные колебания имеют либо четко выраженный максимум, либо сильно сглаженный пик. Сейши раскачались в каждом заливе, однако метеоцунами не зафиксировано. В 4 пунктах (Сосуново, Рудная Пристань, Преображение, Пусан) наблюдались инфрагравитационные волны в виде прибойных биений.

Спектрально-временной анализ отразил динамику распределения энергии по частотам. Хорошо заметно возбуждение высокочастотных волн в Сосуново, Рудной Пристани, Преображении, Посьете, Пусане и Сайго. В Советской Гавани, Владивостоке, Посьете и Нагасаки низкочастотные колебания наблюдаются вне зависимости от циклонов.

На основе сопоставления данных с результатами реанализа ERA5 выявлена достаточно тесная связь между инфрагравитационными волнами и высотой ветровых волн, особенно в Рудной Пристани и Преображении. В формировании прибойных биений участвуют инфрагравитационные волны как сгенерированные в прибрежной зоне, так и в открытом море. В Преображении распределение части точек от тайфунов на диаграммах рассеяния имеет дугообразную форму в виде буквы «Г».

Таким образом, тайфуны в Японском море вызывают спектр волн разного происхождения, которые усиливают или ослабляют друг друга и трансформируются в прибрежной зоне под влиянием топографии заливов и формы береговой линии.

## Использованная литература

1. *Heidarzadeh M., Rabinovich A. B.* Combined hazard of typhoon-generated meteorological tsunamis and storm surges along the coast of Japan //Natural Hazards. – 2020. – С. 1-34.
2. *Lin L.C., Wu C.H.* Unexpected meteotsunamis prior to Typhoon Wipha and Typhoon Neoguri //Natural Hazards. – 2020. – С. 1-14.
3. *Stuivenvolt A.J. et al.* Three western pacific typhoons strengthened fire weather in the recent northwest US conflagration //Geophysical Research Letters. – 2021. – Т. 48. – №. 3. – С. e2020GL091430.
4. *Боуден К.* Физическая океанография прибрежных вод: [Пер. с англ.яз.] / К. Боуден. – М.: Мир, 1988. – 324 с.
5. *Лабзовский Н.А.* Непериодические колебания уровня моря. – Гидрометеиздат, 1971.
6. *Григоркина Р.Г., Фукс В.Р.* Воздействие тайфунов на океан. – Гидрометеиздат, 1986.
7. *Pugh D., Woodworth P.* Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes. – Cambridge University Press, 2014.
8. *Рабинович А.Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. – 1993.
9. *Honda K. et al.* An investigation on the secondary undation of oceanic tides, carried out by the order of Earthquake Investigation Committee during, 1903-06 //J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo. – 1908.
10. База данных Мирового океана, температура восточных азиатских морей: <https://www.ncei.noaa.gov/access/east-asian-seas-climate/bin/easregclfig.pl?parameter=t> (Дата обращения: 02.02.2021)
11. База данных Мирового океана, соленость восточных азиатских морей: <https://www.ncei.noaa.gov/access/east-asian-seas-climate/bin/easregclfig.pl> (Дата обращения: 02.02.2021)
12. Физико-географическое описание Японского моря: <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-yaponskoe-more/> (Дата обращения: 02.02.2021)

13. Циркуляция атмосферы: <https://tvoiklas.ru/zirkuliazia-atmosferi/> (Дата обращения: 02.02.2021)
14. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 08. Японское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Справочник. Проект Моря. — Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 2003. — 397 стр.
15. Дальневосточный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ДВНИГМИ): <http://www.ferhri.org/> (Дата обращения: 15.04.2021)
16. Дальневосточный научно-исследовательский гидрометеорологический институт о Российской службе предупреждения о цунами: <http://ferhri.org/napravleniya-rabot/2017-06-25-23-13-34/2017-07-27-01-32-53/83-rossijskaya-sluzhba-preduprezhdeniya-o-tsunami.html> (Дата обращения: 15.04.2021)
17. *Шевченко Г.И., Ивельская Т.Н.* Цунами и другие опасные морские явления в портах Дальневосточного Региона России (по инструментальным измерениям). – Южно-Сахалинск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2013. – 44 с.
18. Российская служба предупреждения о цунами: <http://www.rtw.s.ru/> (Дата обращения: 17.09.2020)
19. Мониторинг уровня моря станций мира ИОС: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/map.php> (Дата обращения: 17.09.2020)
20. Описание реанализа ERA5: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (Дата обращения: 15.04.2021)
21. Описание баз данных реанализа ERA5: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/The+family+of+ERA5+datasets> (Дата обращения: 15.04.2021)
22. *Кондрин А.Т.* Методы гармонического анализа приливов // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2008. – №. 5.
23. *Рабинович А.Б.* Спектральный анализ океанографических рядов наблюдений: некоторые рекомендации по применению. – 2003. – 65 стр.
24. *Бендат Д., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных. – 1989.



25. *Кондрин А.Т.* Волновые процессы в океане: учебное пособие. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. – 140 с.
26. *Rabinovich A.B., Stephenson F.E.* Longwave measurements for the coast of British Columbia and improvements to the tsunami warning capability //Natural Hazards. – 2004. – Т. 32. – №. 3. – С. 313-343.
27. *Thomson R.E., Emery W.J.* Data analysis methods in physical oceanography. – Newnes, 2014.
28. *Egbert G.D., Erofeeva S.Y.* "Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides." Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 19.2 (2002): 183-204.
29. *Медведев И.П., Рабинович А.Б., Куликов Е.А.* Приливные колебания в Балтийском море //Океанология. – 2013. – Т. 53. – №. 5. – С. 596-596.
30. Траектории ураганов по базам данных NOAA: <https://coast.noaa.gov/hurricanes/#map=4/32/-80> (Дата обращения: 02.12.2020)
31. Статья издательства «Комсомольская Правда», в которой упоминается о 50-летнем рекорде по силе ветра тайфуна Майсак: <https://www.dv.kp.ru/daily/217180/4284359/> (Дата обращения: 16.09.2020)