

## МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ

ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

## высшего образования

# «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Океанологии

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Особенности короткопериодных внутренних волн Охотского моря по данным спутниковых радиолокационных наблюдений»

Исполнитель: \_\_\_\_Кулик Константин Владиславович\_\_\_\_\_

Научный руководитель: \_\_\_\_\_

Научный консультант: \_\_\_\_\_

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой\_\_\_\_\_

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент\_\_\_\_\_

(ученая степень, ученое звание)

Лукьянов Сергей Васильевич\_\_\_\_\_

(фамилия, имя, отчество)

«<u>»</u>\_\_\_\_20\_\_г.

г. Санкт-Петербург 2022 г.

# Оглавление

Введение	3
Глава 1. КВВ и особенности гидрологических условий в Охотском море	4
1.1 КВВ как предмет исследования	4
1.2 Характеристика объектов исследования	6
Глава 2. Материалы и методы.	11
2.1 Материалы.	11
2.2 Методика обработки данных наблюдений	12
2.3 Статистический анализ	17
2.3.1 Первичные статистики	17
2.3.2 Расчет эмпирических гистограмм	18
2.3.3 Корреляционный анализ	18
Глава 3. Особенности короткопериодных внутренних волн Охотского мор по данным спутниковых радиолокационных наблюдений	я 20
3.1 Статистические характеристики КВВ	20
3.1.1 Первичные статистики	20
3.1.2 ЭФР и проверка ее соответствия нормальному закону	23
3.1.3 Корреляционный анализ.	25
3.2 Анализ очагов генерации	26
3.3 Пространственно-временная изменчивость КВВ	28
3.3.1 Пространственно-временная изменчивость КВВ за июнь	28
3.3.2 Пространственно-временная изменчивость КВВ за июль	32
3.3.3 Пространственно-временная изменчивость КВВ за август	36
3.3.4 Пространственно-временная изменчивость КВВ за весь исследуемый период	40
Заключение	10
Список литературы	
children har ben	••••

#### Введение

Внутренние волны – весьма интересный, но малоизученный процесс. Но человечество не стоит на месте, и новые технологии ежедневно появляются в нашей жизни. Люди стремятся все больше изучать мир и все происходящие в нем процессы.

До недавнего времени океанология, и вся наука в целом, была направлена на изучение и понимание крупномасштабных процессов, таких как мировые течения, циркуляция океана и атмосферы и другие подобные глобальные явления. Но с появлением и внедрением в исследовательскую деятельность новых технологий стало намного проще изучать явления меньшего характера.

Появление спутниковых радиолокаторов дало возможность подробнее изучать короткопериодные внутренние волны в любой точке Мирового океана, находить их очаги генерации, определять характеристики и отслеживать сезонную изменчивость.

Целью данной работы является анализ характеристик и пространственно-временной изменчивости поверхностных проявлений внутренних волн по данным радиолокационных наблюдений в Охотском море за лето 2019 года.

Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

1) Загрузка исходных данных (радиолокационные изображения)

2) Визуальная обработка спутниковых снимков и обнаружение на них короткопериодных внутренних волн

3) Обработка полученных данных с использованием различных ПО, для их дальнейшего анализа и визуализации

4) Проведение статистического анализа основных характеристик

5) Анализ очагов генерации внутреннего волнения

6) Анализ пространственно-временно изменчивости короткопериодных внутренних волн

3

### Глава 1. КВВ и особенности гидрологических условий в Охотском море.

### 1.1 КВВ как предмет исследования.

Внутренние волны являются важной частью мелкомасштабных процессов в потоках геофизической жидкости. Они возникают как в океане, так и в атмосфере за счет восстанавливающего действия сил плавучести на частицы жидкости, смещенных из положения равновесия. И в атмосфере, и в океане жидкость стратифицирована по плотности, так что более плотная жидкость лежит под более легкой. Этот градиент плотности поддерживает распространение внутренних волн на границе раздела двух слоев устойчиво стратифицированной жидкости. Подобно границе раздела воздух-море, когда эта граница раздела нарушена, волны распространяются горизонтально вдоль границы, создавая тонкие узоры шероховатости на поверхности, которые позволяют обнаруживать их методами дистанционного зондирования и даже глазом [5].

Особый интерес представляют собой поверхностные проявления внутренних волн в океане. Они играют важную роль в процессах горизонтального и вертикального обмена и перемешивания вод и в формировании термохалинной циркуляции водоемов. Амплитуда внутренних волн может достигать в океане ста метров, длины волн — многих километров, но колебания водной поверхности при этом обычно ничтожны. Тем не менее, при определенных условиях внутренние волны могут проявляться на поверхности океана, модулируя ветровую рябь своими орбитальными течениями. Основная форма поверхностных проявлений внутренних волн в океане — это чередование квазипараллельных полос выглаженной (слики) и шероховатой (сулои) морской поверхности.

Поверхностные проявления внутренних волн в океане визуализируются на радиолокационных изображениях морской поверхности в виде чередующихся полос усиления и ослабления радиолокационного сигнала, обусловленных модуляцией мелкомасштабной составляющей спектра

4

поверхностного волнения переменными течениями, создаваемыми в приповерхностном слое внутренними волнами (рис.1) [2].

Что касается изучения короткопериодных внутренних волн в акватории Охотского моря – исследований очень маленькое количество. На просторах сети можно обнаружить лишь несколько русскоязычных статей, что говорит об актуальности данного исследования.



Рисунок 1.1 Примеры проявлений КВВ на радиолокационном изображении.



### 1.2 Характеристика объектов исследования

Масштаб 1:12 500 000

Рисунок 1.2 Карта Охотского моря

В Основные физико-географические черты. цепочке наших дальневосточных морей оно занимает срединное положение, довольно глубоко вдается в Азиатский материк, а от Тихого океана отделено дугой Курильских островов. Охотское море почти повсюду имеет естественные рубежи и только на юго-западе от Японского моря его отделяют условные линии: м. Южный — м. Тык и в проливе Лаперуза м. Крильон — м. Соя. Юговосточная граница моря идет от м. Носяппу (о. Хоккайдо) через Курильские острова до м. Лопатка (Камчатка), при этом все проходы между о. Хоккайдо и Камчаткой включаются в Охотское море. В этих пределах пространство моря простирается с севера на юг от 62°42′ до 43°43′ с. ш. и с запада на восток от 134°50' до 164°45' в. д. Море значительно вытянуто с юго-запада на северовосток и расширено примерно в своей центральной части (рис. 38).

Охотское море — одно из наиболее крупных и глубоких морей нашей страны. Его площадь равна 1603 тыс. км2, объем 1318 тыс. км 3, средняя глубина 821 м, наибольшая глубина 3916 м. По географическому положению, преобладанию глубин до 500 м и значительным пространствам, занятым большими глубинами, Охотское море относится к окраинным морям смешанного материково-окраинного типа [1].



Рисунок 1.3 Характер приливов Охотского моря

В Охотском море хорошо выражены и периодические (приливные) течения. Здесь наблюдаются их различные виды: полусуточные, суточные и смешанные с преобладанием полусуточной или суточной составляющих. Скорости приливных течений различны — от нескольких сантиметров до 4 м/с. Вдали от берегов скорости течений невелики (5—10 см/с). В проливах, заливах и у берегов скорости приливных течений значительно возрастают, например в Курильских проливах они доходят до 2—4 м/с.

Приливы Охотского моря имеют весьма сложный характер. Приливная волна входит с юга и юго-востока из Тихого океана. Полусуточная волна продвигается к северу, а на параллели 50° разделяется на две ветви: западная поворачивает на северо-запад, образуя севернее м. Терпения и в северной части Сахалинского залива амфидромические области, восточная продвигается по направлению к заливу Шелихова, при входе в который возникает еще одна амфидромия. Суточная волна также продвигается на север, но на широте северной оконечности Сахалина делится на две части: одна входит в залив Шелихова, другая доходит до северо-западного берега.

В Охотском море наблюдается два основных типа приливов: суточные и смешанные. Наибольшее распространение имеют суточные приливы. Они наблюдаются в Амурском лимане, Сахалинском заливе, на Курильских островах, у западного берега Камчатки и в Пенжинском заливе. Смешанные приливы наблюдаются на северном и северо-западном побережьях моря и в районе Шантарских островов. Наибольшая величина приливов отмечена в Пенжинской губе у м. Астрономического (до 13 м). Это наибольшие приливы для всего побережья РФ. На втором месте район Шантарских островов, где величина прилива превышает 7 м. Весьма значительны приливы в Сахалинском заливе и в Курильских проливах. В северной части моря величина приливов доходит до 5 м. Наименьшие приливы отмечались у восточного берега Сахалина, в районе пролива Лаперуза. В южной части моря величина приливов 0,8—2,5 м. В общем приливные колебания уровня в

Охотском море весьма значительны и оказывают существенное влияние на его гидрологический режим, особенно в прибрежной зоне [1].



Рисунок 1.4 Течения в Охотском море

На юго-восточной периферии циклонического круговорота Центральной части моря выделяется ветвь Северо-Восточного течения, противоположного по направлению Курильскому течению (или Ойясио) в Тихом океане. В результате существования этих потоков в некоторых из Курильских проливов образуются устойчивые области конвергенции течений, что приводит к опусканию вод и оказывает существенное влияние на распределение океанологических характеристик не только в проливах, но и в самом море. И наконец, еще одна особенность циркуляции вод Охотского моря — двухсторонние устойчивые течения в большинстве Курильских проливов.

Непериодические течения на поверхности Охотского моря наиболее интенсивны у западных берегов Камчатки (11—20 см/с), в Сахалинском заливе (30—45 см/с), в районе Курильских проливов (15—40 см/с), над Южной котловиной (11—20 см/с) и в течении Соя (до 50—90 см/с). В центральной части циклонической области интенсивность горизонтального переноса значительно меньше, чем на его периферии. В центральной части изменяются от 2 до 10 см/с, причем преобладают скорости меньше 5 см/с. Аналогичная картина наблюдается и в заливе Шелихова, довольно сильные течения у берегов (до 20—30 см/с) и небольшие скорости в центральной части циклонического круговорота [1].

## Глава 2. Материалы и методы.

## 2.1 Материалы.

Для анализа характеристик проявлений короткопериодных внутренних волн были использованы данные спектрорадиометров Sentinel-1A и Sentinel-1B с поляризацией HH и VV, и пространственным разрешением до 40 м в период с 1 июня 2019 года по 31 августа 2019 года.

Тип данных	радарные
Режим съемки	4 режима съемки
Спектральные каналы	С-диапазон
Пространственное разрешение в надире, м	от 4 до 40 в зависимости от режима съемки
Ширина полосы съемки в надире, км	от 80 до 400 в зависимости от режима съемки
Период повторной съемки	1 раз в 1-3 дня

Рисунок 2.1 Характеристики спектрорадиометров Sentinel-1А и Sentinel-



Рисунок 2.2 Внешний вид Sentinel-1В

1**B** 

После выбора объекта исследования и интересующего промежутка времени были скачаны 536 спутниковых изображений. Спутниковые снимки были отобраны и загружены с сайта Alaska Satellite Facility (ASF) Data Search https://search.asf.alaska.edu.



Рисунок 2.3 Карта покрытия Охотского моря сайта Alaska Satellite Facility (ASF) Data Search

Последующая обработка радиолокационных изображений и детектирование внутренних волн на них описано в следующей главе (2.2).

### 2.2 Методика обработки данных наблюдений.

Внутренние волны на морской поверхности в радиолокационных изображениях проявляются в виде дугообразных чередующихся светлых и темных полос, образующих волновые пакеты. Это явление обусловлено различными характеристиками отражения радиолокационного сигнала капиллярными поверхностными волнами, модулированными течением, возникающим при прохождении КВВ. Для каждого поверхностного проявления внутренних волн определены такие характеристики, как положение проявления, длина волны, длина дуги лидирующего гребня в пакете, направление распространения, количество волн в пакете [3].



Рис 2.4 Схематическое описание КВВ

Все РЛИ обрабатывались с помощью программы SNAP.

Пример полной обработки радиолокационного изображения с проявлением внутренних волн представлен на рисунках ниже.



Рисунок 2.5 Исходное радиолокационное изображение

Первый шаг при обработке изображения – выравнивание яркости, так как исходные снимки достаточно темные, и сложно визуально определять внутренние волны (рисунок 2.5).



Рисунок 2.6 Выравненное по яркости изображение и постановкой пинов

Далее для корректного подсчета и сохранения трансект каждой волне присваивается номер и рядом ставится пин(булавка). Иногда, на снимках в местах высокой генерации внутренних волн, их встречается большое количество, поэтому этот шаг необходим (рисунок 2.6).



Рисунок 2.7 Готовые к сохранению трансекты

Последние действия — это построение трансект и их сохранение. При визуальном обнаружении волны проводятся две трансекты – вдоль лидирующего гребня и поперек пакета, от центра гребня до последней волны (рисунок 2.7).

Затем каждая трансекта сохраняется отдельно – лидирующие гребни имеют название «crest», а линия поперек волны «transect». Они подписываются в соответствии с номером пина. К номеру волны для поперечных трансект приписывается количество волн в пакете, подсчитанных для каждой внутренней волны вручную (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 Завершение обработки изображения и сохранение трансект

A MATLAB R2022a			- 0 ×
HOME PLOTS APPS EDITOR P	ush view	1 9 0 🛱 🕈 0	Search Documentation 🛛 🔎 🌻 Sign In
	% % 🗊 🔯 Section Break		
·····································	S will Rev and Advance		
New Open Save Print Go To Refacto	Analyze Kun Step Stop		
FILE NAVIGATE	DE ANALYZE SECTION RUN		
			م -
Current Folder	feltor - C\Dinlom\Result\CODFS\WPLOTm	Workspace	•
□ Name ▲	README.tt X INPLOT X export.fig.m X print2erray.m X import.nest.m X +	Name	Value
M import_nest.m ^	1 figure (1)	em3	64x3 double
MAP_CRESTS.tif	2 set(gcf, 'Color', 'w', 'Units', 'normalized', 'OuterPosition', [0 0 1 1]) %place of figure	DATA	540x8 double
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190604T074244_20190604T074313_027527_0	3 worldmap([42 65],[135 165]); Хэдесь необходимо указать границы карты: первый массив - широта, второй - долгота	doubleZ	5823x2701 double
S1A_IW_GRDH_150V_2019060410/4244_2019060410/4313_02/527_0	<pre>4 setm(gca, maprojection', mercator', 'labelformat', 'compass');% "mlabellocation', [8:18:/1], 'plabellocation', [68:5:82]); %mercato 5 = mlabellocation', [8:18:/1], 'plabellocation', [68:5:82]); %mercator</pre>	figureHandle	Ix1 Figure
STA_IW_GRDH_TSDV_2019060410/4244_2019060410/4313_02/527_0	<pre>&gt; m = massel(on ); 5 safm 'Verticallisement' 'hasalina').</pre>	file	'S1B_IW_GRDH_1SDV
S1A IW GRDH 15DV 20190605T082018 20190605T082048 027542 0	7 surfm(X, Y, doublez),	h h	IxI Figure
S1A IW GRDH 15DV 20190605T082018 20190605T082048 027542 0	8 caxis([-6000 0])		246
S1A_IW_GRDH_15DV_20190605T082018_20190605T082048_027542_0	9 colormap (cm3),	- 1 iw	1x1 struct
S1A_IW_GRDH_15DV_20190605T082018_20190605T082048_027542_0	10 hh <u>e</u> colorbar('Position',[0.67 0.2 0.02 0.64])	10 m	3x1 Text
S1A_IW_GRDH_15DV_20190605T201201_20190605T201229_027549_0	11 hh.Label.String=Глубина, м';	SUMMER	346x8 table
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190605T201201_20190605T201229_027549_0	12 geoshow('OS.shp', 'FaceColor', [0.705882353 0.705882353 0.705882353]),	💼 txts	346x1 struct
STA_IW_GRDH_ISDV_201906051201201_01906051201229_027549_0	13 48	H X	5823x2701 double
S1A JW GRDH 15DV 20190605T201201 20190605T201229 027549 0	15		3823X27U1 BOUDIE
\$1A_IW_GRDH_15DV_20190605T201201_20190605T201229_027549_0	16 txts -dir('C:\Diplom\Result\CRESTS(*.txt*'); Хэдесь необходимо задать путь к файлам гребней		
\$1A_IW_GRDH_1SDV_20190606T072624_20190606T072653_027556_0	<pre>17 h = waitbar(0, 'Please wait');</pre>		
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190606T072624_20190606T072653_027556_0	18 for ii=1:length(txts)		
\$1A_IW_GRDH_1SDV_20190606T072624_20190606T072653_027556_0	<pre>19 file = txts(ii).name;</pre>		
STA_IW_GRDH_TSDV_201906061072624_201906061072653_027556_0	20 DAIA = Import_nest(Tile);		
S1A_W_GRDH_150V_201906061072624_01906061072633_027556_0	21 Lon = (Unin(1:5)); 22 Lat = (DaTa(1:4));		
\$1A IW GRDH 15DV 20190606T072624 20190606T072653 027556 0	23 figure (1),		
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190607T195529_20190607T195554_027578_0	24 hold on,		
\$1A_IW_GRDH_1SDV_20190607T195529_20190607T195554_027578_0	<pre>25 plotm(Lat,Lon,'Color','r', 'LineWidth', 1.5)</pre>		
S1A_JW_GRDH_1SDV_20190607T195529_20190607T195554_027578_0	26 clear('Data', 'Lat', 'Lon');		
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190607T195529_20190607T195554_027578_0	<pre>27 waitbar(ii/length(txts))</pre>		
S1A_W_GRDH_15DV_201906071195529_201906071195554_027578_0	28 ° end		
S1A_W_GRDH_15DV_201906071195529_201906071195554_027578_0	29 CLOSE(II) 30 hold on		
S1A JW GRDH 15DV 20190607T195529 20190607T195554 027578 0	31 figureHandle = gcf:%for font		
S1A_IW_GRDH_15DV_20190611T192151_20190611T192220_027636_0	32 4		
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190612T081209_20190612T081238_027644_0	Command Window	สี	
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190612T081209_20190612T081238_027644_0	ColorBar with properties:		
S1A_IW_GRDH_15DV_201906121081209_201906121081238_027644_0			
S1A_IW_GRDH_150V_201906121081209_201906121081238_027644_0	Location: 'manual'		
S1A IW GRDH 15DV 20190612T081209 20190612T081238 027644 0 v	Limits: [-6000 0]		
S1A IW GRDH 15DV 20190604T074244 20190604T074313 027527 0318	FontSize: 9		
	Position: [0.6700 0.2000 0.6200 0.6400]		
	Units: 'normalized'		
	snow <u>all properties</u>		
No details available	Warning: printfarray generating a 165.2M pixel image. This could be slow and might also cause memory problems		
	"MALIARY, PARHORMARY QUINTAWARY & AVOID PARK ANNYS, AND GUINA OF BIOW AND MIGHTARY CAUSE MEMORY PROFESS.		
	In export fig (line 338)		
	In IMPLOT (line 36)		
	€>>	·	
1000 I			(c

## Рисунок 2.9 Программный код MathLab

На рисунке 2.9 представлен пример одного из кодов, которые использовались в данной работе. С помощью них обрабатывались и визуализировались данные, строились необходимые рисунки, а

множественные файлы волн заносились в один общий документ, для удобного расчета статистических характеристик.

Таким образом были получены необходимые для анализа данные, а именно:

- длина лидирующего гребня;

- длина волны;

- кол-во волн в пакете;

- направление распространения волны;

- пространственное расположение волн.

### 2.3 Статистический анализ

Описание полученных данных с помощью статистических методов используется для понимания характеристик процесса, его изменчивости и выявления аномалий при их наличии.

В данной работе использовались следующие статистические методы:

- расчет первичной статистики;

- расчет эмпирических гистограмм;

- расчет корреляции.

### 2.3.1 Первичные статистики

Первичная статистика используется для того, чтобы получить общее представление об исследуемом процессе. В работе использовались следующие статистические характеристики:

- среднее значение характеризует так называемый «центр тяжести» исследуемой характеристики при разных ее отклонениях или колебаниях;

$$\overline{\mathbf{X}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \mathbf{X}_i \tag{2.1}$$

- дисперсия и связанное с ней стандартное отклонение характеризуют среднее рассеяние значений ряда от его среднего значения;

17

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})^2$$
(2.2)

$$\sigma = \sqrt{D} \tag{2.3}$$

- коэффициент эксцесса характеризует островершинность распределения. Если эксцесс меньше нуля, эмпирическая функция распределения считается плосковершинной, следовательно распределение стремится к случайному.

$$E_{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_{i} - \overline{X})^{4} - 3}{n\sigma^{4}}$$
(2.4)

#### 2.3.2 Расчет эмпирических гистограмм

Эмпирические гистограммы показывают интенсивность процесса, а также повторяемость его характерных или аномальных значений.

Для построения гистограммы используются следующие формулы:

По формуле 2.5 определяется количество интервалов, адекватное для расчета эмпирической функции распределения.

$$k_{max} = 5 \lg n \tag{2.5}$$

Чтобы интервалы были равны, их размах определяется по формуле 2.6.

$$\Delta X_k = \frac{Xmax - Xmin}{k_{max}}$$
(2.6)

### 2.3.3 Корреляционный анализ

Между двумя характеристиками может существовать связь, которая бывает функциональной и стохастической. Для оценки взаимосвязи между интересующими переменными используется коэффициент корреляции (формула 2.7), характеризующий степень тесноты линейной зависимости. Линейная зависимость двух случайных величин заключается в том, что при

возрастании одной величины другая имеет тенденцию возрастать (или убывать) по линейному закону.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} [(x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2)]}{N\sigma_1 \sigma_2}$$
(2.7)

где  $x_{i1}$  и  $x_{i2}$  - значения первой и второй переменных соответственно;  $\overline{x}_1$  и  $\overline{x}_2$  – средние значения первой и второй переменных соответственно;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ 

– стандартные отклонения первой и второй переменных соответственно;
 N –длина рядов первой и второй переменных.

Если |r|=1, взаимосвязь между характеристиками является функциональной, следовательно каждому значению переменной соответствует только одно значение второй переменной.

Если |r|=0, каждому значению переменной соответствует любое значение второй переменной. В таком случае связь абсолютно случайная, или выражаясь другими словами, она отсутствует.

В большинстве случаев 0<|r| <1, и связь между характеристиками – стохастическая. При стохастической связи одному значению переменной соответствует некоторое значение другой переменной с вероятностью |r|.

Характер связи определяется по соотношению значений двух переменных. Если при возрастании одной величины другая имеет тенденцию возрастать – это прямая зависимость, тогда r> 0. Если при возрастании одной величины другая имеет тенденцию убывать – это обратная зависимость, тогда r <0 [4].

# Глава 3. Особенности короткопериодных внутренних волн Охотского моря по данным спутниковых радиолокационных наблюдений.

## 3.1 Статистические характеристики КВВ

Первым шагом после обработки всех радиолокационных изображений, был проведен статистический анализ. Для начала были рассчитаны первичные статистики основных характеристик короткопериодных внутренних волн, а именно длины волны, длины лидирующего гребня и количества волн в пакете.

Обработанные в программном коде MathLab изображения были сгруппированы в массив данных. Следующие расчеты проводились с помощью Microsoft Excel.

## 3.1.1 Первичные статистики

На 536 изображениях было обнаружено 346 проявлений короткопериодных внутренних волн. Для них были рассчитаны первичные статистики.

Таблица 3.1 Первичные статистики для ряда длин волн, длин лидирующего гребня и количества волн в пакете (dim – единица измерения характеристики)

Показатель	Длина лидирующего гребня, км	Длина волны, км	Кол-во волн в пакете, шт
Среднее, dim	12,47	0,45	6,37
Стандартное отклонение, dim	7,94	0,40	3,40
Дисперсия выборки,dim <sup>2</sup>	62,96	0,16	11,57
Эксцесс	7,23	9,81	5,87
Асимметричность	2,06	2,50	1,91
Минимум, dim	2,06	0,01	2
Максимум, dim	60,05	2,99	26
Размах вариации, dim	58,00	2,98	24



Рисунок 3.1 Гистограмма распределения: а) длины лидирующего гребня; б) длины волны; в) количества волн в пакете.

Из таблицы 3.1 и рисунка 3.1, можно отметить, что подавляющая часть внутренних волн имеет длину лидирующего гребня от 7 до 11 км (96 случаев), 11-15 км (84 случая) и от 2 до 7 км (76 случаев). Далее по встречаемости идут волны с длиной гребня 15-20 км (45 случаев). Внутренние волны с длиной гребня в промежутках 24-29 и 29-33 км были обнаружены 19 раз и 14 раз соответственно, что же касается волн с длиной 35 км и больше, их можно считать редкими или аномальными явлениями.

С характеристиками длины волы ситуация немного проще. В основном встречаются внутренние волны с наименьшей длиной до 0,2 км (126 случаев). Далее наиболее распространены волны длиной от 0,2 до 0,5 км (104 случая). Оставшиеся обнаруженные волны имеют длину 0,5 км и больше, но с ее увеличением количество волн резко снижается.

Для количества волн в пакете ситуация весьма схожа с предыдущей – при увеличении характеристики, количество случаев проявления убывает. Так мы имеем большинство внутренних волн с 4-6 (131 случай) волнами в пакете. Случаи с проявлением менее 4 или более 8 волн в пакете уже наблюдаются вдвое реже (53 и 60 случаев). Волны с более чем 13 волнами в пакете можно считать единичными случаями.

### 3.1.2 ЭФР и проверка ее соответствия нормальному закону

Следующим шагом ряды длины волн и лидирующего гребня были проверены на нормальность. Так же для них рассчитана эмпирическая функция распределения.

Длина волн:

Τa	блица	. 3	.2	Расчет	з ЭФI	э знач	ачений длины		ИНЫ	волны
Номер интервала	Интер	овалы	Żk	Частота, mk	Накопленная частота, m'	Интегральная вероятность, p'=m'/N	f(xk, Χ΄, σ)	nk*	nk	$\frac{(m_k - n_k)^2}{n_k}$
	00	до	0.42	400	126	0.250	0.70	50.45	50	70 72
1	0,01	0,24	0,13	126	126	0,359	0,72	58,15	58	/9,72
2	0,24	0,47	0,36	104	230	0,655	0,98	78,79	79	7,91
3	0,47	0,70	0,59	49	279	0,795	0,95	76,39	76	9,59
4	0,70	0,93	0,81	33	312	0,889	0,66	53,00	53	7,55
5	0,93	1,16	1,04	15	327	0,932	0,33	26,31	26	4,65
6	1,16	1,39	1,27	8	335	0,954	0,12	9,35	9	0,11
7	1,39	1,62	1,50	4	339	0,966	0,03	2,38	2	2,00
8	1,62	1,84	1,73	3	342	0,974	0,01	0,43	0	0,00
9	1,84	2,07	1,96	2	344	0,980	0,00	0,06	0	0,00
10	2,07	2,30	2,19	0	344	0,980	0,00	0,01	0	0,00
11	2,30	2,53	2,42	0	344	0,980	0,00	0,00	0	0,00
12	2,53	2,76	2,65	0	344	0,980	0,00	0,00	0	0,00
13	2,76	2,99	2,88	2	346	0,986	0,00	0,00	0	0,00
χ2							111,54			
χκρ								1,15		

Для каждого интервала рассчитана плотность вероятности нормального закона и критерий  $\chi^2$ , а также его критическое значение. Построен совмещенный график ЭФР и нормального закона распределения для ряда длин волн (рис.3.2).

Для проверки на соответствие ЭФР нормальному закону привлекается статистический критерий  $\chi^2$ . Он характеризует совокупность относительных различий ЭФР и теоретического распределения (в частности, нормального закона).  $\chi^2$  для ряда длин волн равен 111,54, при критическом значении  $\chi^2$ = 1,15. Из этого следует, что различия между ЭФР и нормальным законом статистически значимы и ЭФР не соответствует нормальному закону, среди факторов, влияющих на характеристику, есть один или несколько преобладающих.



Рисунок 3.2 Совмещенный график ЭФР и нормального закона распределения для ряда длин волн.

Длина лидирующего гребня:

Таблица 3.2 Расчет ЭФР значений длины лидирующего гребня

Номер интервала	Интер	валы	Żk	Частота, mk	Накопленная частота, m'	Интегральная вероятность, p'=m'/N	f(xk, Χ΄, σ)	nk*	nk	$\frac{(m_k - n_k)^2}{n_k}$
1	2,1	6,5	4,29	76	76	0,217	0,03	46,28	46	19,57
2	6,5	11,0	8,75	96	172	0,490	0,05	70,54	71	8,80
3	11,0	15,4	13,21	84	256	0,729	0,05	78,38	78	0,46
4	15,4	19,9	17,67	45	301	0,858	0,04	63,50	63	5,14
5	19,9	24,4	22,13	19	320	0,912	0,02	37,50	37	8,76
6	24,4	28,8	26,59	14	334	0,952	0,01	16,14	16	0,25
7	28,8	33,3	31,05	5	339	0,966	0,00	5,07	5	0,00
8	33,3	37,7	35,52	2	341	0,972	0,00	1,16	1	0,00
9	37,7	42,2	39,98	2	343	0,977	0,00	0,19	0	0,00
10	42,2	46,7	44,44	1	344	0,980	0,00	0,02	0	0,00
11	46,7	51,1	48,90	0	344	0,980	0,00	0,00	0	0,00
12	51,1	55,6	53,36	0	344	0,980	0,00	0,00	0	0,00
13	55,6	60,1	57,82	2	346	0,986	0,00	0,00	0	0,00
									χ2	42,98
									χкр	1,15

Ситуация весьма схожа с предыдущей.  $\chi^2$  для ряда длин волн равен 42,98, при критическом значении  $\chi^2 = 1,15$ . Из этого следует, что различия между ЭФР и нормальным законом статистически значимы и ЭФР не соответствует нормальному закону, среди факторов, влияющих на характеристику, есть один или несколько преобладающих.



Рисунок 3.4 Совмещенный график ЭФР и нормального закона распределения для ряда длин лидирующего гребня.

### 3.1.3 Корреляционный анализ.

Для корреляции были выбраны два ряда: длина лидирующего гребня и длина волны. Полученный коэффициент корреляции R=0,48, был проверен на значимость путем сравнения значения  $t^*$  с критическим значением tkp по уровню значимости  $\alpha=0.05$  с числом степеней свободы N-2.

t\*=11,69, что больше tкp=1,97, делаем вывод, что нулевая гипотеза отвергается и коэффициент корреляции значим, т.е. между двумя переменными существует статистически значимая связь.

Так как коэффициент корреляции равен 0,48, следовательно связь является прямой стохастической т.е. одному значению первой переменной соответствует некоторое значение второй переменной с определенной вероятностью. Исходя из того, что характер связи прямой, при возрастании одной величины другая имеет тенденцию возрастать.



Рисунок 3.5 График связи длины лидирующего гребня и длины волны.

## 3.2 Анализ очагов генерации

После расчета статистических параметров, был проведен анализ очагов генерации.

В MathLab была построена карта с географическим расположением внутренних волн в акватории Охотского моря (рис.3.6).



Рисунок 3.6 Пространственная карта проявлений короткопериодных внутренних волн в Охотском море.

Из данного рисунка видно, что основные очаги генерации располагаются около острова Сахалин и залива Шелихова. Разберем их по отдельности.

Первый и вероятно самый крупный очаг генерации – около южных берегов Сахалина, заливов Анива и Мордвинова.

Следующий крупный очаг – центральная и северная часть Сахалина.

И третий, наименее слабый – залив Шелихова.

### 3.3 Пространственно-временная изменчивость КВВ

Для лучшего понимания изменчивости внутренних волн и их характеристик за летний период, сначала необходимо разобрать каждый месяц индивидуально.

### 3.3.1 Пространственно-временная изменчивость КВВ за июнь

За июнь 2019 года было обработано 170 радиолокационных изображений. На них было обнаружено 165 внутренних волн.

Далее представлены гистограммы распределения их характеристик, посчитанные с использованием кода MathLab.



Рисунок 3.7 Гистограмма распределения длины лидирующего гребня за июнь 2019.







Рисунок 3.9 Гистограмма распределения количества волн в пакете за июнь 2019.

Исходя из полученных гистограмм (рис.3.7-3.9), видно, что подавляющее большинство внутренних волн имеет длину лидирующего гребня от 2 до 15 км, в среднем 12 км. Значения длин волн имеют уже больший разброс, но все же большинство волн имеет длину до 500 м, а все что больше встречается реже (5 проявлений и меньше). Среднее значения длины волн соответственно 480 м. Внутренние волны в июне содержали от 2 до 16 волн в пакете.

Далее для понимания пространственного расположения волн и их характеристик были построены карты.



Рисунок 3.10 Длина лидирующего гребня за июнь 2019.



Рисунок 3.11 Длина волны за июнь 2019.

На рисунках 3.10 и 3.11 видно, что подавляющее большинство волн сконцентрировано в описанных ранее очагах генерации. Длина лидирующего гребня и длина волны в основном распределены в них достаточно равномерно, но можно заметить несколько аномально высоких значений в заливе Шелихова и у северной части Сахалина.

## 3.3.2 Пространственно-временная изменчивость КВВ за июль

За июль 2019 года было загружено и обработано 173 радиолокационных изображения. Количество снимков почти совпадает с июнем, но проявлений внутренних волн было меньше – 108 случаев.

Ниже также представлены гистограммы характеристик и карты их распределения.



Рисунок 3.12 Гистограмма распределения длины лидирующего гребня за июль 2019.







Рисунок 3.14 Гистограмма распределения количества волн в пакете за июль 2019.

По сравнению с предыдущим месяцем, значения длин лидирующего гребня имеют меньший размах вариации, и большую вариативность, хоть основная масса значений находится в схожих с июнем пределах – от 4 до 18 км. Среднее значение длины гребня 13 км. Длины волн в июле также имеют меньший размах, но большинство волн имеют ту же длину – до 500 метров, в среднем 450. Последняя характеристика изменилась в обратную сторону, половина обнаруженных внутренних волн имеет 4 и 5 волн в пакете.



Рисунок 3.15 Длина лидирующего гребня за июль 2019.



Рисунок 3.16 Длина лидирующего гребня за июль 2019.

Взглянув на карты (рис. 3.15 и 3.16) можно увидеть знакомую ситуацию. Как и в июне, около 90% волн сконцентрировано в очагах генерации. Длина лидирующего гребня распределена достаточно равномерно, а вот длина волн имеет достаточно высокие значения около заливов Терпения и Анива.

## 3.3.3 Пространственно-временная изменчивость КВВ за август

За последний месяц, то есть август, было обработано наибольшее количество радиолокационных изображений – 193 снимка. Но не смотря на столь объемные исходные данные, удалось обнаружить лишь 73 короткопериодные внутренние волны.



Рисунок 3.17 Гистограмма распределения длины лидирующего гребня за август 2019.



Рисунок 3.18 Гистограмма распределения длины волны за август 2019.



Рисунок 3.19 Гистограмма распределения количества волн в пакете за август 2019.

Анализируя гистограммы характеристик (рис. 3.17-3.19), можно сделать вывод что за исследуемый летний период август оказался самым «спокойным». Почти все волны имеют длину лидирующего гребня от 2 до 20 км, среднее осталось схожим предыдущими месяцами – 12 км. Длина волны уменьшилась, основная масса значений не превышает 400 м, а среднее значение 370 м. Число волн в пакете схоже с июнем, но максимальные значения выше. Количество волн в основном варьируется от 2 до 10 штук, в среднем 7.



Рисунок 3.20 Длина лидирующего гребня за август 2019.



Рисунок 3.21 Длина лидирующего гребня за август 2019.

## 3.3.4 Пространственно-временная изменчивость КВВ за весь

### исследуемый период

Финальный этап анализа пространственно-временной изменчивости внутренних волн – обобщение перечисленных выше результатов и анализ всего сезона целиком.



Рисунок 3.22 Гистограмма распределения длины лидирующего гребня за лето 2019.



Рисунок 3.23 Гистограмма распределения длины волны за лето 2019.



Рисунок 3.24 Гистограмма распределения количества волн в пакете за лето 2019.



Рисунок 3.25 Длина лидирующего гребня за лето 2019.



Рисунок 3.26 Длина лидирующего гребня за лето 2019.

Для лучшего описания характеристик, и их наглядного сравнения, помимо гистограмм и карт, была построена таблица сравнения.

Таблица 3.3 Сравнение характеристик внутренних волн за летний период.

Месяц	Июнь	Июль	Август	Весь период
Кол-во обнаруженных волн, шт	165	108	73	346
Длина лидирующего гребня, км	2-60	4-32	2-46	2-60
Средняя длина гребня, км	12	13	12	12
Длина волны <i>,</i> м	50-3000	10-1450	50-1400	10-3000
Средняя длина волны, м	500	450	370	450
Кол-во волн в пакете, шт	2-16	2-26	2-23	2-26
Среднее кол-во волн в пакете, шт	6	7	7	7

Исходя из таблицы 3.3, можно сделать следующие выводы об изменчивости короткопериодных внутренних волн в Охотском море летом 2019 года:

1) Наибольшая генерация внутренних волн наблюдается в июне. В данном месяце наблюдалось 165 волн, а это 48% от всех обнаруженных.

 Длина лидирующего гребня за все месяцы достаточно схожа, варьируется от 2-60 км, среднее значение практически одинаково – 12 км. Лишь в июле среднее выросло до 13 км.

3) Длина волн за сезон находится в пределах от 10 до 3000 м. Ее среднее значение – 450 м, а месячные изменения незначительны – 50 и 80 метров соответственно.

4) За исследуемый период внутренние волны содержали от 2 до 26 волн в пакете, в среднем 7 штук.

#### Заключение

В ходе данной работы были проанализированы характеристики и пространственно-временная изменчивость поверхностных проявлений внутренних волн в Охотском море за лето 2019 года.

В результате было загружено и обработано 536 спутниковых изображений, на которых обнаружено 346 проявлений внутренних волн. Максимум наблюдался в июне – 165 проявлений, минимум в августе – 73 проявления.

Полученные данные были обработаны в программном коде MathLab. Здесь же были построены гистограммы распределения характеристик длины лидирующего гребня, длины волны и количества волн в пакете, и карты их пространственного распределения в акватории Охотского моря.

Статистический анализ показал, что большинство волн имеет длину лидирующего гребня от 7 до 11 км (96 случаев), 11-15 км (84 случая) и от 2 до 7 км (76 случаев). В основном встречаются внутренние волны с наименьшей длиной до 0,2 км (126 случаев) и длиной от 0,2 до 0,5 км (104 случая). Большинство внутренних волн встречаются с 4-6 (131 случай) волнами в пакете. Распределение рядов длины лидирующего гребня и длины волн не соответствуют нормальному закону. Что касается связи между этими двумя характеристиками – он присутствует. Коэффициент корреляции между длиной гребня и длиной волны равен 0,48, следовательно при возрастании одной из величин, растет и другая.

Практически все внутренние волны были обнаружены в очагах генерации, а именно – около острова Сахалин и залива Шелихова.

Наиболее подробно была описана пространственно-временная изменчивость. Наибольшая генерация внутренних волн наблюдается в июне. В данном месяце наблюдалось 165 волн, а это 48% от всех обнаруженных. Длина лидирующего гребня за все месяцы достаточно схожа, варьируется от 2-60 км, среднее значение практически одинаково – 12 км. Лишь в июле среднее выросло до 13 км. Длина волн за сезон находится в пределах от 10 до

45

3000 м. Ее среднее значение – 450 м, а месячные изменения незначительны – 50 и 80 метров соответственно. За исследуемый период внутренние волны содержали от 2 до 26 волн в пакете, в среднем 7 штук.

## Список литературы

1) А. Д. Добровольский Б. С. Залогин Моря СССР Москва 1982

2) Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О.Ю. Лаврова,

А.Г. Костяной, С.А. Лебедев и др. М.: ИКИ РАН, 2011. 40 с

3) Свергун Е. И., Зимин А. В. Характеристики короткопериодных внутренних волн Авачинского залива по данным экспедиционных и спутниковых наблюдений, выполненных в августе – сентябре 2018 года // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 300–312.

4) Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». – СПб, изд. РГГМУ, 2017.

5) Robinson, I. S. Discovering the Ocean from Space: The Unique Applications of Satellite Oceanography. London: Springer, 638 p.

6) М.И. Митягина «Механизмы отображения процессов и явлений в океане и приводном слое атмосферы на радиолокационных изображениях морской поверхности» 2016

7) Werner Alpers «Theory of radar imaging of internal waves» 1985