

Заведующему кафедрой

Океанологии

(наименование кафедры)

Царёву В.А.

(ФИО заведующего)

от студента гр. № 0-65 направление
подготовки (специальность) 05.03.05

Прикладная гидрометеорология

профиль - Прикладная океанология

Ахметгалеев Артёма Артуровича

(ФИО студента)

ЗАЯВЛЕНИЕ-УВЕДОМЛЕНИЕ

Прошу Вас утвердить (или изменить) тему выпускной квалификационной работы
Характеристики судоприливной изменчивости
течений в Западной Соловецкой Салке Белого моря
по данным экспедиционных наблюдений

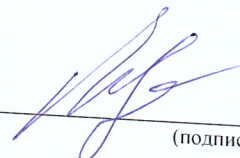
и назначить научным руководителем Зимина А.В.

Я, ознакомлен(-а) с действующим положением «О выпускной квалификационной работе».

Уведомляю о согласии проведения проверки текста данной выпускной квалификационной работы в системе «Антиплагиат».

Даю согласие на размещение текста своей ВКР и приложений к ней в ЭБС ГидроМетеоОнлайн.

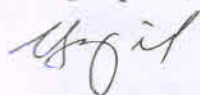
«31» мая 2016 года.

 / Ахметгалеев А.А.
(подпись / расшифровка)

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(РГГМУ)

Допущен к защите

Зав. кафедрой д. ф. – м. н., проф.



В. А. Царёв

— .06.2016

Кафедра океанологии

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ
Характеристики субприливной изменчивости
течений в Западной Соловецкой Салме
Белого моря по данным экспедиционных
наблюдений

Выполнил

А.А. Ахметгалеев,
гр. О – 65

Руководитель

к. ф. – м. н., доцент
А. В. Зимин

Санкт-Петербург 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра океанологии

Рецензия на выпускную квалификационную работу

Студента А. А. Ахметгалеева

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

**Характеристики субприливной изменчивости течений в Западно Соловецкой Салме
Белого моря по данным экспедиционных наблюдений**

Рецензент Глок Н.И., к.г.н., старший научный сотрудник отдела взаимодействия океана и атмосферы ФГБУ "ААНИИ"

Выпускная квалификационная работа специалиста Ахметгалеева А.А. посвящена исследованию течений в одном из районов Белого моря.

Работа Ахметгалеева А.А. состоит из 3 глав, введения, заключения и списка использованной литературы из 15 наименований.

Во введении сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе выполнен обзор сведений о структуре вод и приливных характеристик вод Белого моря, рассмотрены общие закономерности гидрологического режима Белого моря.

Во второй главе описаны методики проведения экспериментов.

В третьей главе обсуждаются результаты расчетов. Выявлена большая изменчивость течений в районе исследования. Для каждой компоненты скорости течения были выделены основные влияющие факторы, для U компоненты было выделено три, а для V компоненты два влияющих фактора и показаны глубины их влияния. Естественно сами факторы интерпретированы далеко не в полной мере, что не позволяет определить большое количество выделенных периодичностей.

В заключении перечислены основные выводы.

В целом работа оставляет хорошее впечатление, однако стоит отметить неаккуратное оформление рисунков и таблиц и формальное представление результатов

применения статистических пакетов. А так же, учитывая большое количество данных, было бы интересно сравнить результаты смоделированных оценок с реальными измерениями.

В целом же следует отметить достаточно высокие теоретические знания автора в области гидрометеорологии, непосредственное участие автора работы в получении данных, грамотное использование статистических методов анализа информации, умение обобщать и анализировать получаемые результаты.

Содержание выпускной квалификационной работы специалиста соответствует заданию, а оформление сделано в полном соответствии ГОСТу.

Считаю, что выпускная квалификационная работа Ахметгалеева А.А заслуживает оценки «отлично».

Ст. науч. сотр. отдела взаимодействия океана и атмосферы
ФГБУ "ААНИИ"

К. Г. Н.



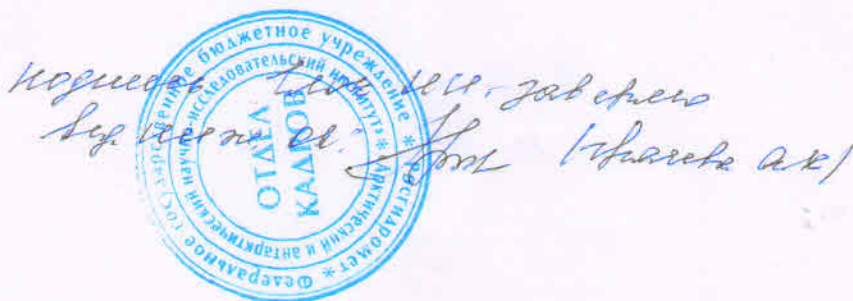
Глок Н. И.

С Результатами ознакомлен



(подпись студента)

«21» июня 2016 г.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра океанологии
Отзыв на выпускную квалификационную работу

Вид работы: ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

Тема: Характеристики субприливной изменчивости течений в Западно Соловецкой Салме
Белого моря по данным экспедиционных наблюдений
Студент: Ахметгалеев Артем Артурович, ФЗО, О-65

Белое море – хорошо изученный район, поэтому задача сделать новое открытие не ставилась, а целью было выявление закономерностей изменчивости скоростей течений в западной салме Белого моря и определение возможных механизмов их формирования.

Работа выполнена с использованием натуральных данных полученных автором во время экспедиции на НИС «Эколог» в августе 2013г.

Автором достаточно полно описан гидрологический режим Белого моря и его географические особенности, а также исходные данные и методы исследований на основе многомерного статистического анализа. Показано, что большую часть изменчивости течений в исследуемом районе формирует полусуточный прилив, что значительно затрудняет само исследование. Автор старательно, а главное самостоятельно выполнял данное исследование в полном объеме.

Полученные профессиональные качества автора:

1. умение адекватно формулировать и ставить задачи в своей деятельности при выполнении дипломной работы, умение анализировать полученные результаты;
2. объективно оценивать недостатки в своей работе;
3. устанавливать приоритеты и выбирать методы решения поставленных задач;
4. владение современными методами многомерного анализа.

Из недостатков можно отметить, что достаточно сложно следить за «нитью» проводимых расчетов и степенью достижения полноты проведенных исследований.

Учитывая сложность поставленной задачи, считаю, что Ахметгалеев А.А. полностью готов к самостоятельной работе, а выпускная квалификационная работа заслуживает оценки «отлично».

Текст, представленной выпускной квалификационной работы, не содержит сведений, составляющих государственную тайну.

Текс выпускной квалификационной работы может быть опубликован в ЭБС в полном объеме.

Научный руководитель
25 мая 2016г.



Зимин А.В.

С отзывом ознакомлен



«21» июня 2016 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(РГГМУ)

Кафедра океанологии

АВТОРЕФЕРАТ
ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА
Характеристики субприливной
изменчивости течений в Западной
Соловецкой Салме Белого моря по данным
экспедиционных наблюдений

Выполнил А.А. Ахметгалеев,
гр. О – 65

Руководитель к. ф. – м. н., доцент

А. В. Зимин к

Санкт-Петербург 2016
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Белое море— внутреннее море на севере европейской части России, соединяется с Баренцевым морем и входит в бассейн Северного Ледовитого океана. В настоящее время оно является одним из наиболее изученных арктических морей России, исследование течений которого ведется с XIX века[1]. Основными динамическими факторами, определяющими циркуляцию вод, являются динамическое воздействие ветра и приливные течения.

Крупномасштабная и синоптическая изменчивости гидрофизических полей в Белом море к настоящему времени достаточно хорошо изучены. Вместе с тем закономерности протекания мелко- и мезомасштабных (субмезомасштабных) процессов исследованы недостаточно подробно[2]. Поэтому в настоящее время они активно исследуются, в том числе и в этой работе с помощью статистических анализов. Факторный анализ редко применяется для изучения характеристик приливной изменчивости. Это и предопределяет актуальность работы.

В данной работе используются данные экспедиционных наблюдений 2013г., в которых автор принимал непосредственное участие. Целью работ было получение данных о короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в течение приливного цикла, соответствующего гармонике M2 (период $T = 12.42$ ч), с 15 по 24 августа 2013 г. в юго-западной части бассейна и в проливе Западная Соловецкая Салма[2].

Для оценки субприливной изменчивости, анализируемыми данными стали количественные характеристики изменчивости широтной и меридиональной составляющей скорости течений, снятой измерителем WS - 300 ADCP на придонной станции за период наблюдений с 15 по 20 августа 2013г. Координаты станции: $65^{\circ} 13,215'$ с.ш. , $35^{\circ} 01,694'$ в.д.

Цель работы: по данным натурных наблюдений выполнить статистическую оценку вертикальных особенностей структуры течений методом главных компонент, а так же дать оценку временной изменчивости

с учетом и без учета приливной составляющей с применением спектрального анализа.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. На основе имеющихся массивов данных подготовить матрицы скоростей течений необходимые для изучения приливных процессов;
2. Выполнить статистический анализ полученных данных методом главных компонент, факторным и спектральным анализом;
3. Выявить основные характеристики формирования субприливной изменчивости течений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формируются цели и задачи работы.

Первая глава является обзорной. Она разделена на пять частей и включает в себя физико-географические черты, климатические условия, гидрологический режим, приливы и приливные течения Белого моря и, в частности, пролива Западная Соловецкая Салма.

Во **второй главе** описана методика проведения экспериментов и обработка данных, описание используемых статистических методов, а так же рабочего прибора и принцип его работы. Исходными данными для представленной работы послужили массивы данных скорости течения, полученные в результате наблюдений в 2013г с придонной станции, которая включала в свой состав установленный на немагнитной платформе акустический профилограф течения ADCP WHS-300 kH (США). Экспедиционные работы выполнялись с борта т/х «Нерха» сотрудниками Санкт-Петербургского филиала Института океанологии РАН и студентами

Российского государственного гидрометеорологического университета, в частности и самим автором. Координаты придонной станции: $65^{\circ} 13,215'$ с.ш., $35^{\circ} 01,694'$ в.д.

Кроме измерений течений профилограф регистрировал колебания уровня и придонной температуры с 22:38 15-го августа до 17:05 20-го августа. Дискретность измерений составляла 1 мин, вертикальное разрешение профилирования скорости течения — 1 м.

В статистическом подходе были выбраны факторный анализ методом главных компонент и спектральный анализ. Для них были отобраны значения меридиональной и широтной составляющих скорости течения на глубинах от 18,2 до 58,2 метров.

Третья глава разделена на три части. В них представлены результаты работы и анализ полученных данных. Первая часть посвящена исходным данным. С помощью программы WinADCP по исходным данным был построен и проанализирован график изменения скорости течения для всего интервала измерений. На нем мы видим верхний турбулизированный слой, на который оказывает действие атмосферные факторы. Четко прослеживается слой скачка, который ограничивает и запирает турбулентность в слое до 15 метров. Из наших данных он был исключен. Таким образом, на изменчивость нашего слоя в большей степени оказывал влияние процесс турбулентного вовлечения.

Так же, в первой части были построены графики температуры и солености, уровня моря и изменчивости во времени скоростей U и V составляющей, которые помогали в понимании и обосновании физической стороны протекающих во времени процессов.

Во второй части подробно рассматривается широтная составляющая скорости течений. Для ее значений был проведен факторный анализ МГК, построены таблицы и графики собственных значений и факторных нагрузок.

По ним были выделены два фактора с наибольшим вкладом в общую дисперсию и описывающих изменчивость скорости течений в двух разных слоях: верхнем и нижнем. Для каждого фактора был проведен анализ Фурье по значениям фактора, выделены значимые гармоники. По ним вы сделали вывод, что изменения в широтной составляющей скорости течения в наибольшей степени зависят только от приливных процессов. Выделенные колебания скорости соответствовали полуприливной волне M2 и мелководным M4, M6. Так же наблюдалось долгопериодное колебание с периодом 68 часов.

В третьей части подробно рассматривается меридиональная составляющая скорости течений. Для ее значений был проведен факторный анализ МГК, построены таблицы и графики собственных значений и факторных нагрузок. По ним был выделен лишь один фактор, соответствующий слою от 34,2 до 51,2 метров. Еще два фактора с большим вкладом в дисперсию не рассматривались, т.к. их нагрузки не достигали критических значений 0,7. На графике значений фактора наблюдалась слабо прослеживаемое колебание приливного цикла. На них накладываются короткопериодные вариации колебаний, визуально не имеющие четко выраженного периода и больше напоминающие шум, что вынудило нас проверять эту гипотезу. Амплитуда колебаний постоянно менялась, то возрастая, то убывая. Дальнейший спектральный анализ показал, что помимо полусуточного колебания, график полон короткопериодным колебаниям преимущественно с периодом от 1,5 часа до 6 часов.

Для изучения вертикальной структуры изменчивости скорости течений у меридиональной составляющей было принято решение отойти от МГК и воспользоваться вращением варимакс, который максимизировал нагрузки факторов и выделил еще два для дальнейшего изучения. Вновь был построен график значений первого фактора, проведен анализ к нему. Слой второго фактора сдвинулся и в этот раз растянулся от 33,2 до 46, 2 метров, но в целом не сильно отличился от спектрального анализа по значениям фактора после

МГК. Второй фактор характеризует слой от 20,2 метров до 25,2 метров. В этом слое приливное влияние имело крайне низкие значения периодограммы по сравнению с короткопериодными колебаниями и выражалось слабо. Третий фактор описывает слой от 50,2 до 58,2 метров. В нем так же преобладают короткопериодные колебания от 1,5 часа до 6 часов, но приливная волна более выражена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении работы были использованы различные программные средства, позволившие выполнить необходимые вычисления, анализ данных и построение графиков.

В результате выполнения работы был выбран район Западной СоловецкойСалмы. С помощью программных средств обработаны полученные данные различными статистическими методами. Также проведены исследования временной изменчивости компонент скорости течений, которые позволили выделить основополагающие значимые факторы.

Основываясь на полученных результатах, можно заключить, что изменчивость в Белом море может быть разделена на три группы. В первую входят колебания с периодом 6 – 12 часов, которые соответствуют мезомасштабному интервалу изменчивости гидрофизических полей океана. Ко второй группе можно отнести изменчивость с периодом 1,5 – 6 часа, связываемая с субмезомасштабными вихрями, внутренними волнами, процессами вовлечения и передачи турбулентности верхним слоем. И к третьей группе относятся короткопериодные колебания с периодами от нескольких минут до нескольких десятков минут, относящиеся к мелкомасштабной изменчивости (тонкая структура, турбулентность, короткопериодные внутренние волны) гидрофизических полей. Чтобы четко

выделить мелкомасштабные колебания была построена короткопериодная часть спектра.

Так же по итогам анализа была выявлена группа колебаний с периодом, превосходящим сутки. Но для точного анализа столь крупномасштабных колебаний, требуется более длительный временной ряд.

Результаты спектрального анализа во многом получились неоднозначными в результате того, что предметом изучения были значения факторов, латентных переменных, которые не описывают всю изменчивость скоростей течений на всех горизонтах целиком, а хорошо характеризует лишь часть вертикального профиля. У верхнего слоя, вовлеченного в турбулентность, и у нижнего выделялись колебания с разной периодичностью, так как возбуждались разными процессами. Так же разительно отличались результаты широтной и меридиональной составляющей. В широтной составляющей практически все колебания в скорости обуславливаются приливными явлениями, выделялись волны M2 и M4. Наблюдалась ярко выраженная двуслойная структура. Первый фактор отлично характеризовал хорошую стратифицированность нижнего слоя, расположенного на глубине между 26, 2 и 58,2 метрами. Второй фактор описывал турбулентное вовлечение приповерхностного слоя на слой, начинающийся с 18 метров. Наибольшие значения нагрузок приходилось на уровне от 20,2 до 22,2 метров.

Контрастно этому, меридиональная составляющая была наполнена множеством разнопериодных колебаний, напоминающих белый шум. Без вращения факторные нагрузки принимали слабые значения. Только у генерального фактора они достигали критических значений на слое от 34,2 до 51,2 метров. Поэтому были приняты решение воспользоваться вращением Varimax для описания возможную структуру придонного и верхнего слоя. Как оказалось, только в них присутствует значимое влияние приливных течений (M2, M4, M6), которые описывали второй и третий факторы. Но

наибольшее предпочтение у всех трех факторов было отдано мелкопериодным колебаниям от 1,5 до 6 часов.

Вероятнее всего такие различия возникли из-за географического положения и гидрологического режима, а точнее из-за постоянных течений в той области. В проливе Западная Салма течения направлены на юго-юго-восток. Накладываясь на меридиональную скорость, они, предположительно, могут вызывать пульсации скорости, которые в меньшей степени окажут влияние на широтную составляющую. Так же свою роль может играть изменение направления вектора течений в экмановском слое.

Мелкомасштабные колебания в районах пролива Западная Салма вносят значительный вклад в общую изменчивость скорости течения. Турбулентные процессы на границе раздела вода-воздух и в поверхностном слое оказывают сильное влияние до самого дна, нарушая целостность стратификации. Их определение затрудняется присутствием большого количества различных периодичностей, что требует дополнительного дальнейшего изучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том II Белое море/ под.ред. Б. Х. Глуховского [Текст]. – Л.: Гидрометиздат, 1991. – 240 с.
2. Зимин А. В. Короткопериодная изменчивость гидрофизических полей и характеристик внутреннего волнения в течение суточного приливного цикла в шельфовых районах Белого моря [Текст]. – Океанология – 2013.– Т. 53, № 3.– С. 293 – 303

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(РГГМУ)

Допущен к защите
Зав. кафедрой д. ф. – м. н., проф.
В. А. Царёв
___.06.2016

Кафедра океанологии

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ
Характеристики субприливной изменчивости
течений в Западной Соловецкой Салме Белого
моря по данным экспедиционных
наблюдений

Выполнил	А.А. Ахметгалеев, гр. О – 65
Руководитель	к. ф. – м. н., доцент А. В. Зимин

Санкт-Петербург 2016

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.
	Введение	3
1	Обзор сведений о структуре вод и приливных характеристиках вод Белого моря	5
1.1	Физико – географические черты	5
1.2	Климатические условия	9
1.3	Гидрологический режим	13
1.4	Приливы и приливные течения	15
2	Методика проведения экспериментов и обработка данных	21
3	Особенности субприливной изменчивости в проливе Западная Салма по результатам статистического анализа скорости течений	30
3.1	Исходные данные	30
3.2	Изменчивость скорости течений в проливе Западная Салма по результатам статистического анализа широтной составляющей скорости	34
3.3	Изменчивость скорости течений в проливе Западная Салма по результатам статистического анализа меридиональной составляющей скорости	43
	Заключение	62
	Список использованных источников	65

ВВЕДЕНИЕ

Белое море— внутреннее море на севере европейской части России, соединяется с Баренцевым морем и входит в бассейн Северного Ледовитого океана. В настоящее время оно является одним из наиболее изученных арктических морей России, исследование течений которого ведется с XIX века[1]. Основными динамическими факторами, определяющими циркуляцию вод, являются динамическое воздействие ветра и приливные течения.

Крупномасштабная и синоптическая изменчивости гидрофизических полей в Белом море к настоящему времени достаточно хорошо изучены. Вместе с тем закономерности протекания мелко- и мезомасштабных (субмезомасштабных) процессов исследованы недостаточно подробно[2]. Поэтому в настоящее время они активно исследуются.

В данной работе используются данные экспедиционных наблюдений 2013г., в которых автор принимал непосредственное участие. Целью работ было получение данных о короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в течение приливного цикла, соответствующего гармонике M2 (период $T = 12.42$ ч), с 15 по 24 августа 2013 г. в юго-западной части бассейна и в проливе Западная Соловецкая Салма[2].

Для оценки субприливной изменчивости, анализируемыми данными стали количественные характеристики изменчивости широтной и меридиональной составляющей скорости течений, снятой измерителем WS - 300 ADCP на придонной станции за период наблюдений с 15 по 20 августа 2013г. Координаты станции: $65^{\circ} 13,215'$ с.ш. , $35^{\circ} 01,694'$ в.д.

Цель работы: по данным натурных наблюдений выполнить статистическую оценку вертикальных особенностей структуры течений методом главных компонент, а так же дать оценку временной изменчивости с

учетом и без учета приливной составляющей с применением спектрального анализа.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. На основе имеющихся массивов данных подготовить матрицы скоростей течений необходимые для изучения приливных процессов;
2. Выполнить статистический анализ полученных данных методом главных компонент, факторным и спектральным анализом;
3. Выявить основные характеристики формирования субприливной изменчивости течений.

4. ОБЗОР СВЕДЕНИЙ О СТРУКТУРЕ ВОД И ПРИЛИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД БЕЛОГО МОРЯ

1.1 Физико-географические черты

Среди морей, омывающих Россию, Белое море является самым меньшим после Азовского моря. Площадь его поверхности составляет 90 тыс. км² (Без учета доли островов, на которые приходится 0.8 тыс. км²). Белое море расположено на северной окраине европейской части нашей страны к югу и востоку от Кольского полуострова и занимает пространство между 68°40' и 63°48' с. ш. и 32°00' и 44°30' в. д., целиком находясь на территории России. Наибольшая протяженность моря от мыса Канин Нос до Кеми составляет 600 км, максимальная ширина (между г. Архангельск и г. Кандалакша) – 450 км.

Белое море единственное из арктических морей, которое почти целиком лежит к югу от Полярного круга. Оно глубоко врезано в континент, таким образом, почти со всех сторон имея сухопутные границы. Только от Баренцева моря его отделяет условная граница — линия от м. Святой Нос (68°09' с.ш.) до м. Канин Нос (68°40' с.ш.) [3]. Средняя глубина – 67 м, максимальная – 350 м в районе мыса Турьего (Кандалакшский залив). Объем Белого моря, составляет 5400 км³, длина береговой линии равна 5.1 тыс. км. Акватория Белого моря делится на несколько частей: Бассейн, Горло, Воронка, Онежская губа, Двинская губа, Мезенская губа, Кандалакшский залив (Рисунок 1.1). Онежский и Кандалакшский заливы наиболее сильно изрезаны многочисленными губами и бухтами. Западные берега обрывистые, восточные — низменные.

В Белое море впадают такие крупные реки, как: Кемь, Мезень, Онега, Поной, Северная Двина и множество мелких рек. Беломорско-Балтийский



Веренин. Голубое море является северной, самой многоводной

Святой Нос. На юге Воронку ограничивают условные линии между р. Поной и м. Воронов и между м. Воронов и м. Конушин. Северная граница Мезенской губы проходит по о. Моржовец[6]. На севере Воронки глубины местами достигают 60-70 м, основная же часть акватории Мезенского залива не выходит за пределы изобаты 20 м. Но при этом, этот район моря имеет наиболее сложный рельеф дна, представляющий собой на юге обширное мелководье с ложбинообразным понижением в осевой части на продолжении русла р. Мезени. Вход в Мезенский залив усеян множеством банок, которые распределяются несколькими грядами и известны под названием «Северные кошки». Размеры Северных Кошек и глубины над ними с течением времени меняются под влиянием штормов и приливных течений. Площадь Воронки составляет 24,6 тыс. км², объем 855 км³ и средняя глубина 34 м.

Сравнительно узкий пролив, соединяющий Бассейн и Воронку, называют Горлом Белого моря. Длина этого пролива 170 км, ширина 45-55 км. Границами Горла являются: на северо-востоке — линия, соединяющая м. Данилов — м. Воронов, а на юго-западе — линия, соединяющая м. Никодимский — м. Вепревский. Берега Горла ровные, островов мало, самые крупные — Сосновец и Данилов. Рельеф дна Горла сильно изрезан. Вытянутые вдоль оси пролива аккумулятивные и эрозионные желоба и гряды чередуются с отдельными поднятиями и замкнутыми котловинами. Средние глубины в Горле колеблются в пределах 30-50 м. Большая часть дна Горла представляет собой подводный желоб глубиной около 50 м, вытянутый вдоль пролива несколько ближе к Терскому берегу. Площадь Горла составляет 10,2 тыс. км², объем 380 км³ и средняя глубина 37 м.

Бассейн — это центральная часть акватории Белого моря, и является самой глубоководной. Он ограничивается линиями, отделяющими заливы Двинской, Онежский и Кандалакшский. Берега Бассейна изрезаны слабо, островов мало. Основу рельефа дна составляет центральная впадина с глубинами более 100 м, которая простирается с северо-запада на юго-восток

из Кандалакшского залива в Двинской залив. Она занимает примерно две трети акватории Бассейна и его заливов, и в ее пределах имеются три котловины, разделенные порогами. Глубины каждой котловины достигают более 250 м. В районе п-ова Турий, в одной из котловин, находится максимальная глубина Белого моря - 350 м. Площадь Бассейна составляет 21,8тыс. км², объем 2725км³ и средняя глубина 125 м.

Кандалакшская губа – самый глубокий залив. Берега ее сильно изрезаны, острова многочисленны и объединены в архипелаги: Северный, Керетский, Лувеньгские шхеры, Средние Луды и другие. Самым большим является остров Великий, прикрывающий вход в крупнейшую лагуну моря – Бабье Море. Вершина Кандалакшской губы относительно мелководна, глубины не превышают 50 м. Эта часть губы носит собственное название Кандалуха. Площадь Кандалакшского залива составляет 6,5тыс. км², объем 710км³ и средняя глубина 109 м.

Двинская и Онежская губы представляют собой южную часть моря. Двинская губа заключена между Летним и Зимним берегом. В его кут впадает крупнейшая река бассейна Белого моря – Северная Двина. Островов много, самый крупный – Мудьюгский. Он закрывает собой обширную лагуну – Сухое Море. Площадь Двинского залива составляет 9,6тыс. км², объем 420км³ и средняя глубина 49 м.

Онежский залив, отделенный от центральной части крупнейшими в Белом море Соловецкими островами, самый мелководный, глубины в нем меняются от 5 до 25 м. Он имеет сложный рельеф дна, которое усеяно многочисленными каменистыми банками, "коргами", "лудами", мелями. Неровности донного рельефа в надводной части проявляются в виде большого количества островов, разбросанных почти по всей поверхности залива, особенно в его западной половине: Онежские, Сумские и Кемские шхеры, самые крупные – Большой и Малый Жужмуй. Площадь Онежского залива составляет 12,3тыс. км², объем 235км³ и средняя глубина 19 м.

Восточное побережье моря является частью Русской платформы и имеет небольшие высотные отметки. Южная часть побережья сформирована четвертичными отложениями. Западный берег и острова сложены метаморфическими породами, в основном гранито-гнейсами. На северо-западе, в районе Кандалакшской губы, рельеф имеет тектоническое происхождение [6].

Из всего вышеописанного, можно сделать вывод о том, как неровен и сложен рельеф дна моря. Мелководность северной части и Горла по сравнению с Бассейном затрудняет его водообмен с Баренцевым морем, что играет огромную роль в формировании гидрофизических, гидрохимических и гидрологических полей Белого моря [7].

1.2 Климатические условия

Особенность Белого моря в его затруднительном обмене глубинными водами с Баренцевым морем отражается на его природно-климатических условиях. Положение Белого моря на севере умеренного пояса и частично за Полярным кругом самых северных регионов, принадлежность к бассейну Северного Ледовитого океана, близость Атлантического океана и почти полное окружение сушей со всех сторон, обуславливают как морские, так и континентальные черты в климате моря. Это делает климат Белого моря переходным от океанического к материковому. Воздействие океана и суши проявляется на протяжении всего года.

Для экватории Белого моря в любые сезоны года характерна частая смена воздушных масс, связанная с прохождением барических образований. В среднем погодная моревтечение года в 71% случаев (262 дня) определяется действием циклонических, а в 29% случаев (103 дня) — антициклонических полей атмосферного давления.

Зима на Белом море продолжительная и суровая. В это время над северной частью европейской территории России устанавливается обширный антициклон, а над Баренцевым морем развита интенсивная циклоническая деятельность. Это приводит к тому, что на Белом море дуют преимущественно юго-западные ветры со скоростью 4—8 м/с. В ноябре—марте преобладают области низкого давления (77%), которые в 37% случаев являются мало подвижными или малоградиентными и в 13% — хорошо выражены циклонами, перемещающимися с запада и северо-запада из районов Атлантического океана. Двигаясь с большими скоростями (50—70 км/ч) на восток, они за сутки могут достигать акватории Белого моря. В передней части этих циклонов, как правило, наблюдается выносы теплого и влажного воздуха, что вызывает снегопады, иногда оттепель, штормовой ветер; в тыловых частях — резкие похолодания, штормовой ветер, снегопады с ухудшением видимости. Выходы южных и юго-западных циклонов на акваторию Белого моря отмечаются значительно реже, их повторяемость составляет соответственно 3 и 8%. С ними так же связаны штормовые ветры, снегопады с ухудшением видимости и повышение температуры воздуха от тепели. Зимой акватория моря значительно реже находится под влиянием области повышенного давления (23%), которую создают в основном малоградиентные барические поля или стационарные антициклоны (15%), реже — отроги азорских антициклонов (3%) или скандинавские антициклоны (4%) и крайне редко наблюдаемые карские вторжения холодных воздушных масс (1%).

Весенний период, как и зимой, сохраняется еще большая неустойчивость погоды и относительно быстрая смена синоптических процессов. Наибольшую повторяемость имеют поля пониженного давления, определяемые мало подвижными циклонами (36%). Циклоны, перемещающиеся с запада, с районов Исландии и

Норвежского моря, формируют погоду в 11% случаев.

Повторяемость областей высокого давления по сравнению с зимним сезоном увеличивается: в 20% случаев они связаны со стационарными антициклонами и в 10% случаев с прохождением антициклонов. Повторяемость областей высокого давления, обусловленных прохождением карских и азорских антициклонов, равна 3%. В течение весеннего периода происходит перестройка структуры сезонного барического поля, которая к концу мая уже приобретает летний характер.

Лето на Белом море прохладное и умеренно влажное. В это время обычно к югу и юго-востоку от Белого моря развивается интенсивная циклоническая деятельность. В связи с этим над морем преобладают северо-восточные ветры силой 2—3 балла. Небо покрыто сплошной облачностью, часто выпадают сильные дожди. [7] Повторяемость циклонических областей летом остается на уровне весенних, увеличиваясь до 15% повторяемость областей пониженного давления, связанных с прохождением западных циклонов, число «ныряющих» циклонов по сравнению с зимой несколько уменьшается (11%). Глубина, а также скорости перемещения последних небольшие (25—30 км/ч). На акваторию Белого моря выносятся влажный и прохладный воздух с Атлантики.

Привыходящих циклонов (6%) обычно наблюдаются восточные и северо-восточные ветры со скоростью 12 м/с и более. Как в весну, наибольшую повторяемость в летний период имеют стационарные антициклоны (17%), а наименьшую — азорские (3%) и карские (1%). Чаще всего наблюдается вхождение антициклонов со Скандинавии (11%), что всегда обуславливает на акватории Белого моря холодную погоду с ветрами северных направлений.

Начало осеннего сезона обычно характеризуется активизацией атмосферной циркуляции и увеличением повторяемости областей низкого давления (73%). Они со

даются в большинстве случаев «ныряющими» (19%), западными (8%), юго-западными (10%) и мало подвижными циклонами (31%). Скорость перемещения циклонов осенью увеличивается по сравнению с летним сезоном. В годы с сильной активной циклонической деятельностью, частыми прохождением юго-западных, западных и «ныряющих» циклонов, которые приносят с Атлантики влажную прохладную воздушную массу, на акватории Белого моря отмечается ненастная осень, частыми штормовыми ветрами, дождями. В октябре дожди часто сменяются «зарядами» мокрого снега, ухудшающими видимость. Повторяемость полей повышенного давления осенью составляет 27% и обуславливается в основном стационарными (14%) и скандинавскими (11%) антициклонами. Вторжения холодных карских и теплых атлантических антициклонов наблюдаются редко, их повторяемость составляет 1% [1].

Средняя годовая температура воздуха по многолетним данным за период около 100 лет в районе Карельского побережья Белого моря колеблется от -0.4°C в северной части, до 1.3°C в южной. Самый холодный месяц года – январь ($-10.1 \dots -12.8^{\circ}\text{C}$). В отдельные годы минимальные годовые температуры воздуха могут отмечаться в любой из зимних месяцев. Так понижение температуры до -47°C , отмеченное на МС (метеостанция) Колежда, было зарегистрировано в феврале 1946 г. Самым теплым месяцем в году является июль, со средней суточной температурой воздуха $13.9\text{--}14.7^{\circ}\text{C}$. Абсолютный максимум температуры воздуха составляет $+35^{\circ}\text{C}$ (МС Колежда, Кемь). Годовая амплитуда температуры воздуха в рассматриваемом районе $24\text{--}27^{\circ}\text{C}$.

Характерным признаком наступления весеннего сезона являются дневные оттепели, которые обычно отмечаются в конце марта – начале апреля. Устойчивый переход температуры воздуха через 0°C происходит в 20-х числах апреля, через 5°C – во второй декаде мая. Для весенних сезонов характерен неустойчивый режим погоды, оттепели часто

сменяются заморозками, возможно кратковременное установление снежного покрова. Заморозки возможны в среднем до конца первой декады июня.

Начало лета совпадает с началом безморозного периода, в среднем 10–12 июня, когда температура воздуха устойчиво переходит через 10°C. Период с устойчивым переходом температуры через 15°C в районе Карельского побережья Белого моря отсутствует. Средняя продолжительность летнего сезона на рассматриваемой территории составляет 80 дней.

Осень наступает в последних числах августа – первой декаде сентября. Температура воздуха устойчиво переходит через 10°C в сторону понижения.

Зима в изучаемом районе хотя и не суровая, но длительная. Начало зимнего сезона совпадает со средней датой образования снежного покрова. Переход температуры воздуха через 0°C в сторону понижения отмечается в среднем в третьей декаде октября. Продолжительность периода с устойчивой отрицательной среднесуточной температурой воздуха составляет 180–190 дней [8].

1.3 Гидрологический режим

Белое море — одно из холодных арктических морей, что связано не только с его положением в высоких широтах, но и протекающими в нем гидрологическими процессами. Средняя температура воды летом обычно составляет 6...15°C, зимой - ниже 1°C. Горизонтальное распределение температуры воды на поверхности моря характеризуется большим разнообразием и значительной сезонной изменчивостью. Зимой температура близкая к поверхностной наблюдается в слое до 30-45 м глубины. Глубже, в образовавшемся вследствие летнего прогрева теплом промежуточном слое, температура несколько повышается до горизонта 75-100 м, а затем снова понижается. С глубины около 130-140 м и до дна она постоянная в течение

всего года и составляет $1,4^{\circ}\text{C}$. Весной поверхность моря прогревается до глубины примерно 20 м, а далее следует резкое понижение температуры до 0°C на горизонте 50-60 м. Летом толщина прогретого слоя увеличивается до 30-40 м.

Средняя соленость вод моря составляет 29‰. Опреснение распространяется до глубины 10 – 20 м. Глубже соленость сначала резко, а далее плавно увеличивается до дна. Горизонтальное распределение значений солености крайне неравномерное, минимумы (около 10-12‰) приурочены к заливам, а максимумы (34,5‰) обычно фиксируются в Бассейне. Устойчивая вертикальная стратификация исключает развитие конвекции на большей части моря ниже горизонтов 50-60 м. Несколько глубже (до 80-100 м) вертикальная зимняя циркуляция проникает вблизи Горла, где этому способствует связанная с приливами интенсивная турбулентность. Ограниченная глубина распространения вертикальной зимней циркуляции является характерной особенностью Белого моря.

Летом в Белом море можно выделить шесть водных масс: баренцево-морскую, Горла, поверхностную Бассейна, промежуточную, глубинную, опресненных вод заливов (рисунок 1.2). Баренцево-морские воды занимают Воронку от поверхности до дна. Они практически однородны по всей толще при температуре $5,7^{\circ}\text{C}$ и солености 34,16 ‰. Южная часть Воронки и все Горло заполнены водной массой Горла. Это полностью перемешанные воды при небольшом падении температуры с $6,85^{\circ}\text{C}$ на поверхности до $5,96^{\circ}\text{C}$ у дна и слабом росте солености с глубиной от 27,83 до 28,42 ‰. Поверхностная водная масса распространена по всей площади Бассейна и на глубинах 10—20 м проникает в заливы. Нижняя граница ее распространения 20 м, температура вод $10,0—12,0^{\circ}\text{C}$, соленость 25,9—27,0 ‰. Промежуточная водная масса залегает в слое от 40 до 70 м, что на 10—15 м глубже, чем весной. Зона ее распространения: Бассейн, Двинский и Кандалакшский заливы. Температура промежуточных вод меняется от —0,2

°С в районе, прилегающем к Двинскому заливу и Горлу, до 0,7— 0,9 °С в Кандалакшском заливе и центральной части Бассейна, соленость колеблется в пределах 28,0— 28,2‰. Глубинная водная масса заполняет Кандалакшский залив и Бассейн ниже горизонта 100 м (Т, S – индекс: 1,4 °С и 29,7 ‰). Распресненные воды заливов занимают верхний 5-метровый слой в вершинах Кандалакшского, Двинского и Онежского заливов. Это хорошо прогретые (до 16,1 °С) воды с соленостью 21,2 — 23,0 ‰.

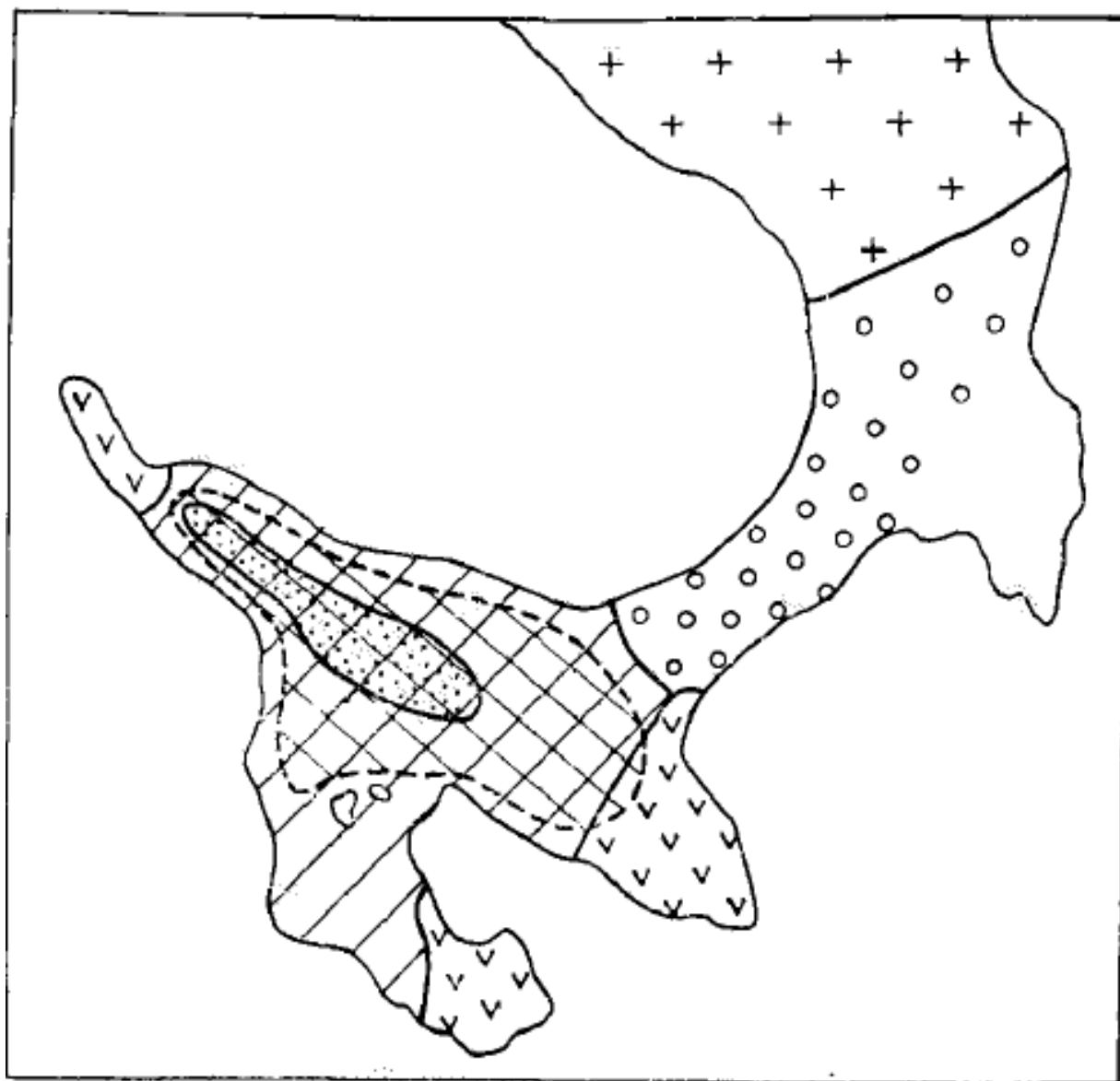


Рисунок 1.2 – Распределение водных масс Белого моря летом: 1 – баренцевоморская; 2 – водная масса Горла; 3 – поверхностная бассейна; 4 – промежуточная; 5 – глубинная; 6 – распресненные воды заливов[1]

1.4 Приливы и приливные течения

Ярко выраженные приливы (см. рис. 1.2) в Белом море часто играют определяющую роль в его термодинамическом режиме. Собственный прилив весьма мал и, как правило, не превышает 3 см. Приливные колебания в Белом море вызываются приливной волной, приходящей из Баренцева моря. В соответствии с этим, данные наблюдений показывают, что величина приливов неравномерна и изменяется от района к району. Наибольшие величины достигаются в Мезенском заливе, в Горле он уменьшается, а в Бассейне едва достигает 1 м. Наименьшие значения фиксируются у м. Вепревского и р. Зимняя Золотица.

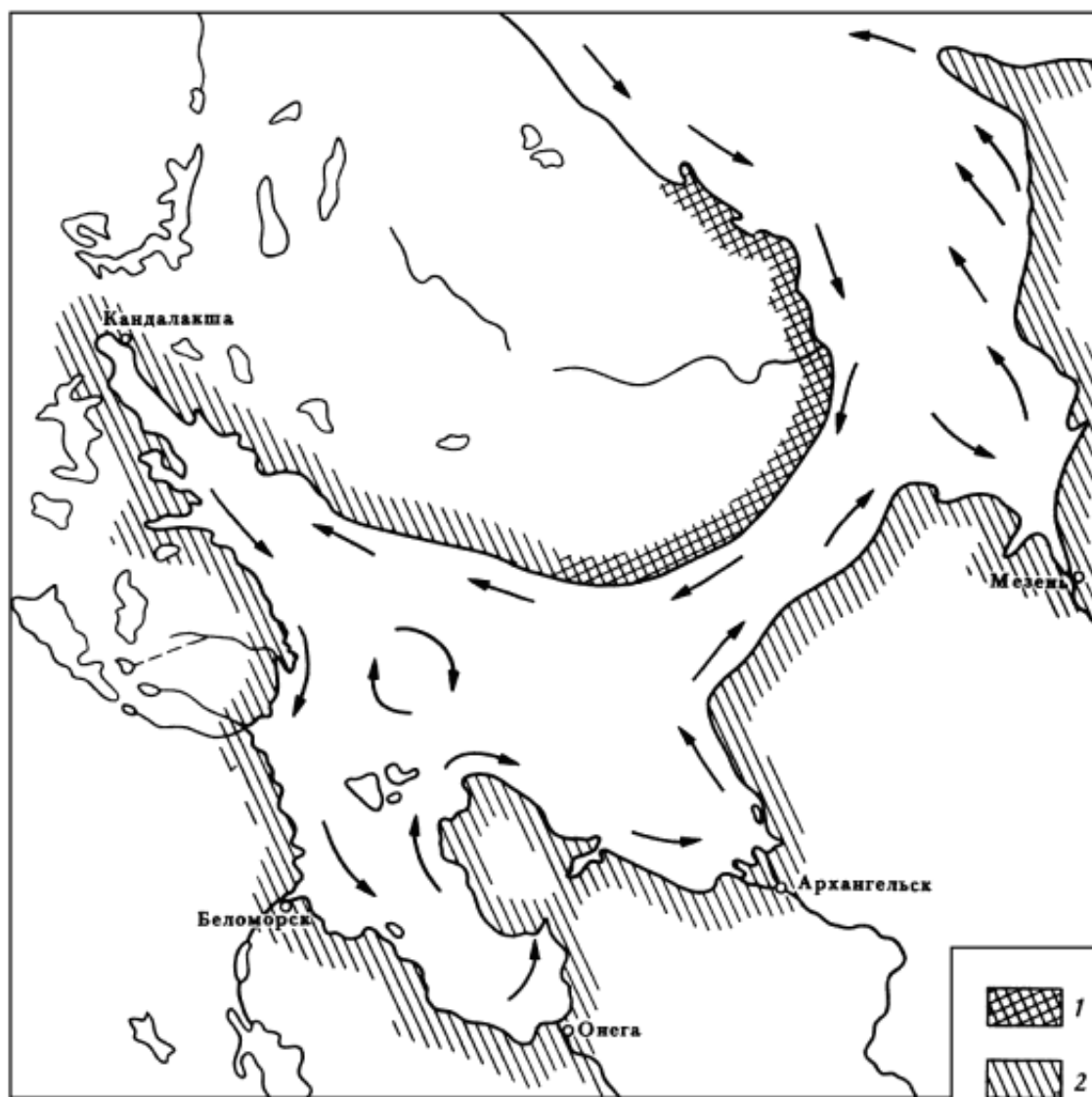


Рис. 1.3 Течения на поверхности и характер приливов в Белом море:

1 — полусуточные; 2 — полусуточные мелководные

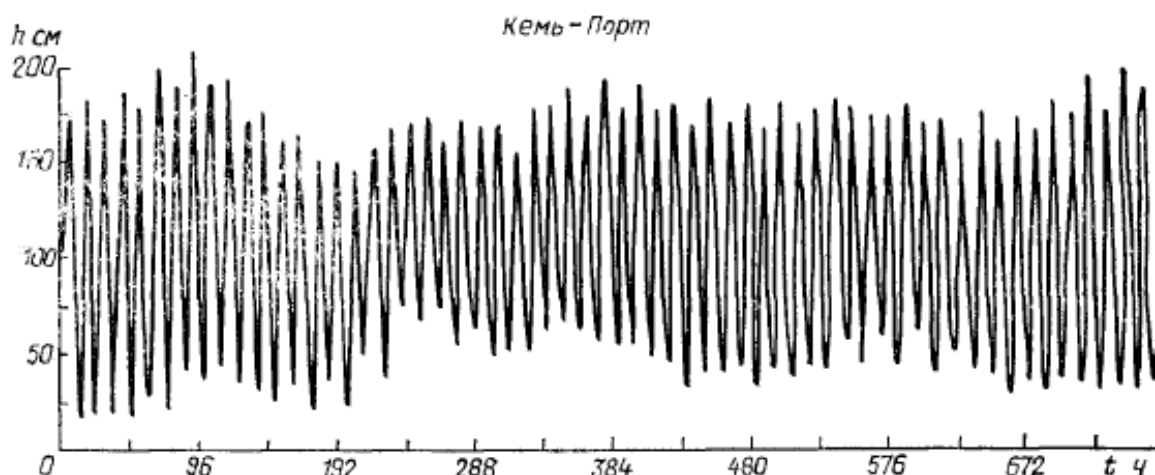


Рисунок 1.4 – Приливные колебания уровня для побережья Белого моря в Кемь-Порте.[1]

Как видно на рисунке 1.4, приливы в Белом Море полусуточные, то есть ежедневно бывают две полные и две малые воды. Но из-за его морфометрических особенностей, приливная волна деформируется, в результате чего отмечаются несимметричные приливы (мелководные). Время падения уровня отличается от времени роста. Моменты наступления и высоты полных и малых вод постепенно меняются. Различают три типа таких изменений: синдический, деклинационный и аномалистический тип.

С приливными волнами связаны приливные течения. В открытой части моря они имеют вращательный характер, направление вектора скорости за приливной цикл описывает эллипс. Вблизи берега и в узких проливах эллипс превращается в прямую, так как течение становится реверсивным. В зависимости от типа волны, формирующей прилив, течение может совпадать по фазе с колебанием уровня моря (прогрессивная волна) или будет в противофазе с ним (стоячая волна). Чаще всего в Белом море имеет место промежуточное состояние (прогрессивно-стоячая волна).

Наибольшие приливные течения в Белом море отмечаются там, где велики приливы. Исключением является район между Горлом и Бассейном, в котором колебания уровня малы, а течения значительны. Те же неравенства, что в приливных колебаниях уровня, соответствуют и приливным течениям.

Приливные течения в северной части моря, Горле и Мезенском заливе сильные, их средняя скорость варьируется от 2 до 5 узлов. В Бассейне Белого моря, в Двинском заливе и почти во всем Кандалакшском заливе приливные течения в большинстве своем слабые, их средняя скорость меняется от центральной части к заливам и варьируется от 0,2 узлов до 1—2 узлов соответственно. В Онежском заливе средняя скорость приливных течений колеблется между 1 и 2 узлами, в проливах скорость достигает до 3,5 уз. Почти на всей акватории Белого моря скорость отливных явлений быстрее приливных на 1 узел. В некоторых местах приливные течения образуют сильные сулои и водовороты.

Общепринятым является представление наблюдаемого прилива в виде суммы простым гармонических составляющих, что позволяет более наглядно описать ее свойства и главные особенности. В Белом море преобладают приливные волны полусуточного периода: M_2, S_2, N_2 и K_2 . Из-за сложной береговой линии и мелководий, эти составляющие в Белом море взаимодействуют друг с другом, нелинейно искажаются и тем самым рождают новые гармоники, которые в силу причин называются мелководными. В Белом море преобладают мелководные $1/4$ -суточные волны M_4 и MS_4 и $1/6$ -суточная волна M_6 . Волны M_4 и M_6 образуются в результате нелинейного искажения полусуточной гармоники M_2 , а MS_4 получается при взаимодействии волн M_2 и S_2 . Эти мелководные волны в большинстве районов Белого моря превышают основные суточные K_1 и O_1 и даже некоторые полусуточные[1].

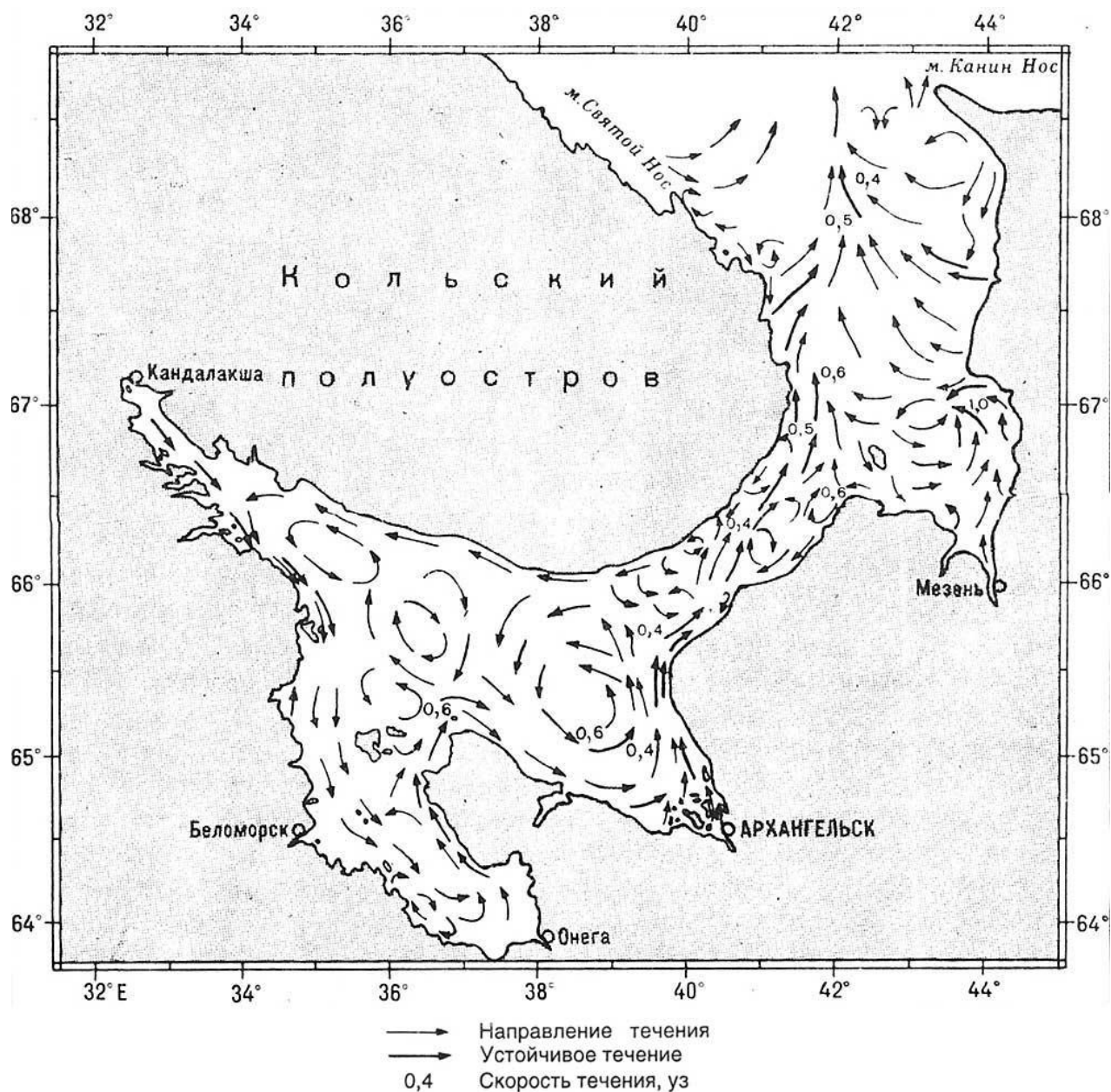


Рисунок 1.5 –Схема постоянных поверхностных течений в Белом море.[9]

Помимо приливных течений в Белом море присутствуют постоянные течения. В Горле и северной части Белого моря ярко выделяется Беломорское стоковое течение, выносящее воды из бассейна Белого моря в Баренцево море. Оно движется в северо-восточном направлении от мыса Зимнегорский к мысу Инцы, а далее в северном — к острову Сосновец, мысу Орлов-

Терский Толстый и затем выходит в Баренцево море. Более слабое стоковое течение действует от устья реки Мезень и разделяющееся на две ветви: одну, сливающуюся с Беломорским течением, и вторую, образующую замкнутую циркуляцию вод в Мезенском заливе.

Хорошо выражаются четыре устойчивых течения. Двинское течение выходит из Двинского залива вдоль Зимнего берега в Горло Белого моря. Еще одно течение выходит из Онежского залива через пролив Восточная Соловецкая Салма и направляется вдоль Летнего берега в Двинский залив. Следующее течение выходит из Кандалакшского залива, движется вдоль Карельского берега к проливу Западная Соловецкая Салма. Постоянное течение, входящее в бассейн Белого моря из Горла, следует вдоль Терского берега до Кандалакшского залива.

Перед входами в Двинский и Кандалакшский и Онежский заливы хорошо выражены устойчивые циклонические течения. Скорость постоянных течений в среднем не преобладает 0,6 узлов.[9]

В Белом море отмечается значительная сезонная изменчивость гидрологической структуры и динамического состояния вод, но летом происходит сглаживание и средний уровень гармонических постоянных приливов приближается к среднегодовой отметке.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Исходными данными для представленной работы послужили массивы данных скорости течения, полученные в результате наблюдений с придонной станции в 2013 г. Экспедиционные работы выполнялись с борта т/х «Нерха» сотрудниками Санкт-Петербургского филиала Института океанологии РАН и студентами Российского государственного гидрометеорологического университета, в частности и самим автором.

В 2013 году была поставлена придонная станция на полигоне № 1, которая включала в свой состав установленный на немагнитной платформе акустический профилограф течения ADCP WHS-300 kH (США). Кроме измерений течений он регистрировал колебания уровня и придонной температуры с 22:38 15-го августа до 17:05 20-го августа. Дискретность измерений составляла 1 мин, вертикальное разрешение профилирования скорости течения — 1 м[2]. Координаты придонной станции: $65^{\circ} 13,215'$ с.ш. , $35^{\circ} 01,694'$ в.д.

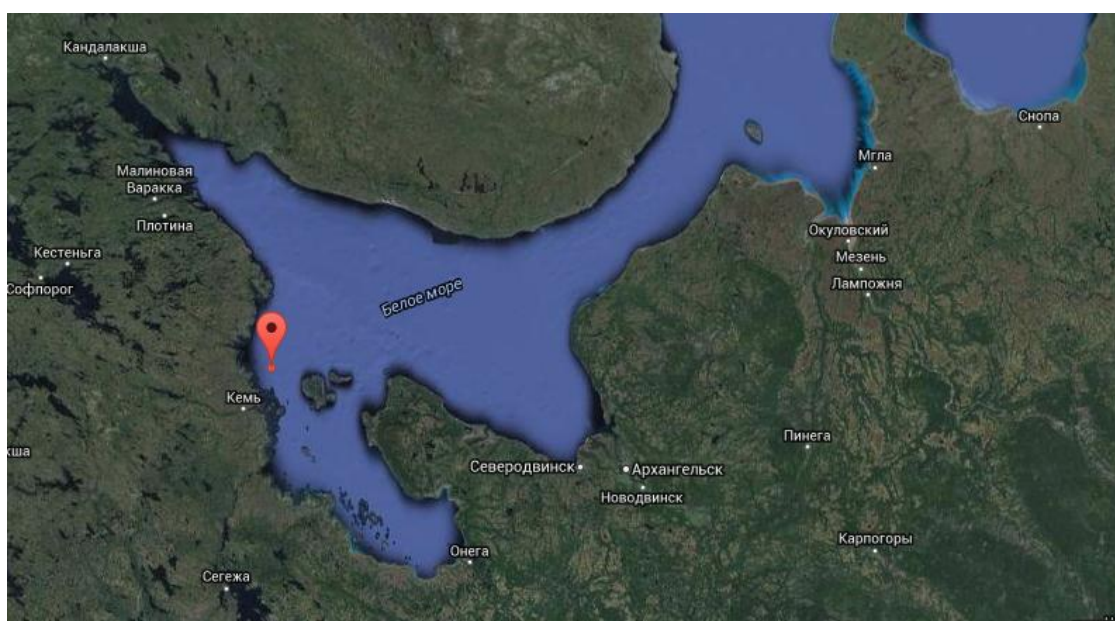


Рисунок 2.1 – Расположение придонной станции в 2013 г.

Внешний вид измерителя WS -300 ADCP представлен на рисунке 2.5. Его работа основана на доплеровском эффекте, когда изменение частоты и длины волны, которые регистрируются приемником, вызывается движением их источника или приемника.

Если источник волн движется относительно среды, то расстояние между гребнями волн (длина волны λ) зависит от скорости и направления движения. Если источник движется по направлению к приёмнику, то есть догоняет испускаемую им волну, то длина волны уменьшается, если удаляется — длина волны увеличивается:

$$\lambda = \frac{2\pi (c - v)}{\omega_0}, \quad (2.1)$$

где ω_0 — круговая частота, с которой источник испускает волны, c — скорость распространения волн в среде, v — скорость источника волн относительно среды (положительная, если источник приближается к приёмнику и отрицательная, если удаляется).

Частота, регистрируемая неподвижным приёмником

$$\omega = 2\pi \frac{c}{\lambda} = \omega_0 \frac{1}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}. \quad (2.2)$$

Аналогично, если приёмник движется навстречу волнам, он регистрирует их гребни чаще и наоборот. Для неподвижного источника и движущегося приёмника

$$\omega = \omega_0 \left(1 + \frac{u}{c}\right), \quad (2.3)$$

где u — скорость приёмника относительно среды (положительная, если он движется по направлению к источнику).

Подставив вместо формуле (2.3) значение частоты из формулы (2.2), получим формулу для общего случая:

$$\omega = \omega_0 \frac{\left(1 + \frac{u}{c}\right)}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}. \quad (2.4)$$

ADCP с определенным интервалом излучает звуковой сигнал некоторой частоты, который отражается от планктона и мелких пузырьков воздуха. Если измерить смещение частоты отражённого сигнала относительно частоты базового сигнала и время его прихода, то можно получить оценку скорости течения на определённой глубине. Чаще применяют четыре излучателя звукового сигнала, что позволяет увеличить точность и определить направление течения (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Электромагнитный позиционный измеритель «WS -300 ADCP» с четырьмя акустическими излучателями.

Данный прибор чаще устанавливают на корабле – направлением вниз, либо устанавливается на якорь или станцию на дне – направлением вверх, так же возможно расположение и на берегу для бокового обзора. При этом необходимо, чтобы датчик соприкасался с водой, в таком случае будет осуществляться передача и измерение звуковых импульсов, которые распространяются в водяном пространстве. От небольших взвешенных частиц или пузырьков отражаются звуковые импульсы, движущихся в акустических лучах, вызывая при этом сдвиг передающегося звука, на основе которого рассчитывается скорость. Это явление носит название – сдвиг Доплера. Импульсы или лучи, посылаемые в разных направлениях, от ADCP распознают различные компоненты скорости, параллельные каждому лучу. Допуская однородность течений в слоях с постоянной глубиной, используется тригонометрическая трансформация для преобразования скорости вдоль лучей в три компонента скорости, которые связаны с декартовой системой координат, ориентированной на прибор. Каждый акустический импульс от ADCP, установленного на корабле, производит измерение скорости по всей глубине потока.

ADCP, установленные на движущемся судне, могут достаточно легко измерять многокомпонентный профиль скорости под судном, автоматически обеспечивая информацию о скорости, глубине и местоположении по мере движения судна. Точность таких приборов составляет 0,25 % для измерений скорости, выполняемых при идеальных условиях однородной горизонтальной скорости, которые практически не наблюдаются. Если в воде мало или совсем нет взвешенных частиц для отражения звуковых импульсов или присутствуют чрезмерные концентрации отложений, которые поглощают звуковые импульсы, не позволяют использовать приборы ADCP. Погрешности скорости могут быть вызваны отложениями, двигающимися вдоль русла.



Рисунок 2.3 – Немагнитная стойка «Gimbale ADCP Platforms»

Прибор WS -300 ADCP устанавливались на специальной донной платформе «Gimbale ADCP Platforms» излучателями вверх, как на рисунке 2.4. Прибор ставился на карданном подвесе, такой крепеж обеспечивал надлежащую ориентацию головки датчика даже на наклонной поверхности морского дна. Все измерения течений производились непосредственно со дна с дискретностью 1 минута. Все полученные данные о характеристиках течений были перенесены на магнитные носители в виде файлов Microsoft Excel.

Для исследования данных, полученных с помощью прибора ADCP и подготовленных к анализу, используем программу STATISTICA. В программе реализован графически-ориентированный подход к анализу данных, дающее всестороннее визуальное представление данных на всех этапах статистической обработки. Предварительно данные были использованы в программе EXCEL, в которой массив данных был преобразован в матрицы в которых столбцы соответствуют численным значениям меридиональной или

широтной составляющей скорости течения на четкоопределенной глубине для каждого момента времени. В строках, соответственно, содержатся значения скоростей течений в определенный момент времени для каждого горизонта.

В дальнейшем был проведен факторный анализ методом главных компонент (МГК) в программе «Statistica». В его основе лежит редукция данных (уменьшения числа переменных) и определение структуры взаимосвязи (их обобщения). С помощью факторного анализа возможно выявление скрытых переменных факторов, отвечающих за наличие линейных статистических корреляций между наблюдаемыми переменными. При анализе в один фактор объединяются сильно коррелирующие между собой переменные, как следствие происходит перераспределение дисперсии между компонентами и получается максимально простая и наглядная структура факторов. После объединения корреляция компонент внутри каждого фактора между собой будет выше, чем их корреляция с компонентами из других факторов.

Для выявления наиболее значимых факторов наиболее оправданно применять метод главных компонент (МГК). Известно, что метод главных компонент (МГК) является одним из эффективных способов сжатия информации и анализа ее пространственно-временной структуры. Эта задача весьма актуальна и при построении прогностических моделей, особенно в тех случаях, когда приходится иметь дело с большими объемами гидрометеорологических данных. Тогда в качестве предикторов могут быть использованы непосредственно главные компоненты (они же естественные ортогональные функции), которые существенно снижают размерность модели. Если удастся сосредоточить дисперсию в первых составляющих, то, отбрасывая незначимые компоненты, мы тем самым отфильтровываем мелкомасштабную изменчивость и возможные случайные ошибки, что весьма полезно с точки зрения прогноза.

Для анализа количество факторов было выбрано равным числу переменных в исходной матрице, минимальное собственное число равным 0,001. В качестве результата было получено 3 отчетных таблицы для каждой составляющей скорости течений: собственные числа, собственные векторы (нагрузки) и значения главных компонент. По собственным числам было оценено сходимость разложения и определено количество исследуемых главных компонент и описываемую ими дисперсию. Так же был построен график каменистой осыпи.

Для собственных векторов была построена карта распределения нагрузок. Выявлены области (группы переменных), определяемые каждой из выбранных главных компонент.

По значениям главных компонент были нарисованы графики временной изменчивости и проведен спектральный анализ, который является мощным инструментом обработки данных, определённых дискретной зависимостью $y(x_i)$ или непрерывной функцией $f(x)$, и имеющий в своей основе различные интегральные преобразования. Спектром совокупности данных $y(x)$ называют некоторую функцию другой координаты $F(\omega)$, полученную в соответствии с определённым алгоритмом. Примерами спектров являются преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Каждое из интегральных преобразований эффективно для решения своего круга задач анализа данных.

Задачами, непосредственно связанными со спектральным анализом, являются проблемы сглаживания и фильтрации данных. Они заключаются в построении из исходной экспериментальной зависимости $y(x_i)$ некоторой (непрерывной или дискретной) зависимости $f(x)$, которая должна приблизить её, учитывая к тому же, что данные (x_i, y_i) получены с некоторой погрешностью, выражающей шумовую компоненту измерений. При этом функция $f(x)$ с помощью того или иного алгоритма уменьшает погрешность, присутствующую в данных (x_i, y_i) . Такого типа задачи называются задачами

фильтрации. Сглаживание путём построения регрессии данных – это частный случай фильтрации.

Преобразование Фурье - преобразование функции, превращающее её в совокупность частотных составляющих. Это интегральное преобразование, раскладывающее исходную функцию по базисным функциям, в качестве которых выступают синусоидальные (или мнимые экспоненты) функции, то есть представляет исходную функцию в виде интеграла синусоид (мнимых экспонент) различной частоты, амплитуды и фазы. Преобразование обратимо, причем обратное преобразование имеет практически такую же форму, как и прямое преобразование.

В основе преобразования лежит идея, что любой ряд можно разложить без остатка в ряд Фурье, т. е. на конечное число гармоник. Современные статистические программы («Statistica», «SPSS» и т. п.) рассчитывают разложение Фурье методом БПФ (быстрого преобразования Фурье).

Математический смысл преобразования Фурье состоит в представлении сигнала $y(x)$ в виде бесконечной суммы синусоид вида $F(\omega) \cdot \sin(\omega x)$. Функция $F(\omega)$ называется преобразованием Фурье, или интегралом Фурье или Фурье – спектром сигнала. Обратное преобразование Фурье переводит спектр $F(\omega)$ в исходный сигнал $y(x)$. Согласно определению,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(x) \times \exp(-i\omega x) dx,$$

Как видно, преобразование Фурье является комплексной величиной, даже если сигнал действительный. Одним из простейших видов колебательных смещений является синусоида, описываемая уравнением вида:

$$y = F(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t = a \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.5)$$

,где a амплитуда колебания, φ -фаза.

С помощью этих величин можно определить коэффициенты A и B :

$$A = a \sin \varphi; B = a \cos \varphi \quad (2.6)$$

Такое синусоидальное колебание является монохроматическим по отношению к частоте ω . Оно имеет одно единственное значение амплитуды a

и фазы φ в функции частоты. Если изобразить эту функцию графически, отложив по оси абсцисс частоту, а по оси ординат – амплитуду (или фазу), то мы получим один отрезок прямой, соответствующей собственной частоте колебаний ω_0 . Это будет простейший амплитудный (или фазовый) спектр функции $y=F(x)$, состоящий в данном случае из одной спектральной линии. . Тогда гармоники, имеющие большую дисперсию (и соответственно, амплитуду), будут представлены «пиками» на соответствующем графике спектра. В нашем исследовании представляется достаточным выявление частот (и соответственно, периодов) для которых отмечаются пики функции спектральной плотности [8].

3. ОСОБЕННОСТИ СУБПРИЛИВНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В ПРОЛИВЕ ЗАПАДНАЯ САЛМА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ

3.1 Исходные данные

В проливе Западная Салма в 2013 году с помощью акустического профилографа течения ADCP WHS-300 kH (США) на придонной станции проводились измерения с 15 до 20 августа. Вертикальное разрешение профилирования скорости течения составляло 1 м с дискретностью измерений в 1 минуту. На рисунке 3.1 показан график изменение скорости течений во времени, построенный на исходных данных с помощью программы WinADCP.

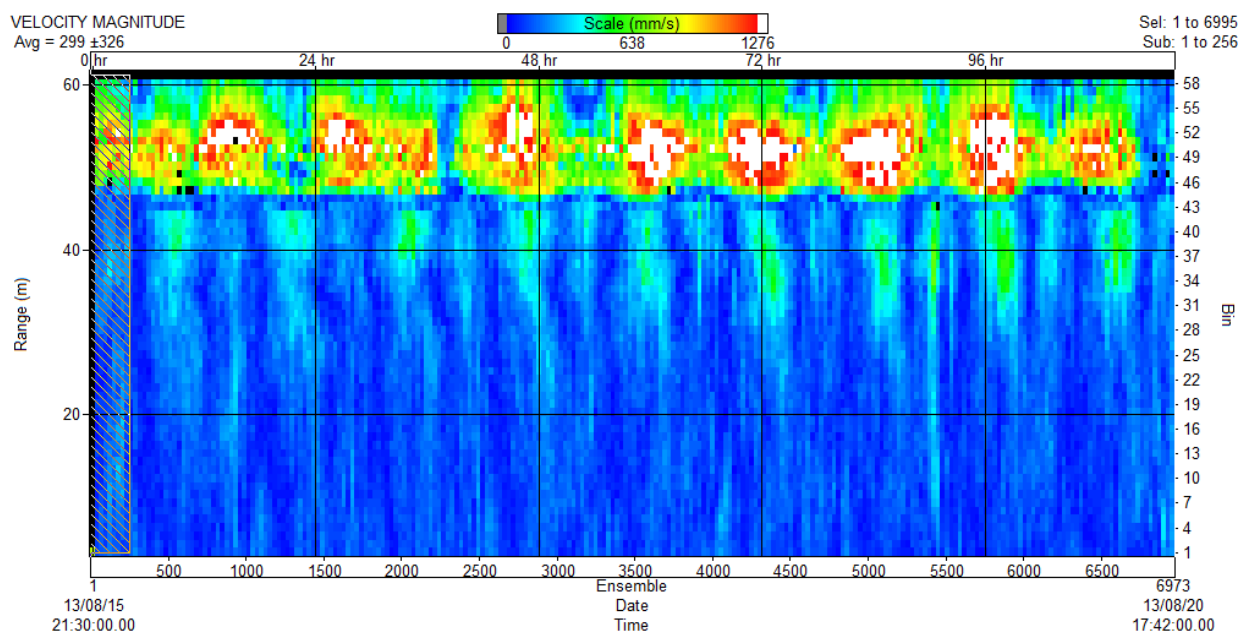


Рисунок 3.1 – Изменчивость скорости течения во времени в проливе Западная Салма в 2013 г.

Внешний вид графика, напоминает эксперимент Рауза и Доду, в котором верхний слой жидкости с непрерывной или двухслойной начальной

стратификацией турбулизировался с помощью решетки. Как и предполагалось, наибольшие значения скорости находятся в верхнем слое сильно подверженном турбулентным процессам в результате влияния атмосферных и приливообразующих факторов. На протяжении всего интервала измерений, у турбулентного слоя ярко выделена нижняя граница, резкая поверхность раздела на глубине 15 метров. Предположительно, она вызвана пикноклином, который «запирает» турбулентный слой, обостряя его. Для подтверждения теории был построен вертикальный профиль солености и температуры (см. рис. 3.2), снятых в том же районе. Его слой скачка соответствует границе раздела.

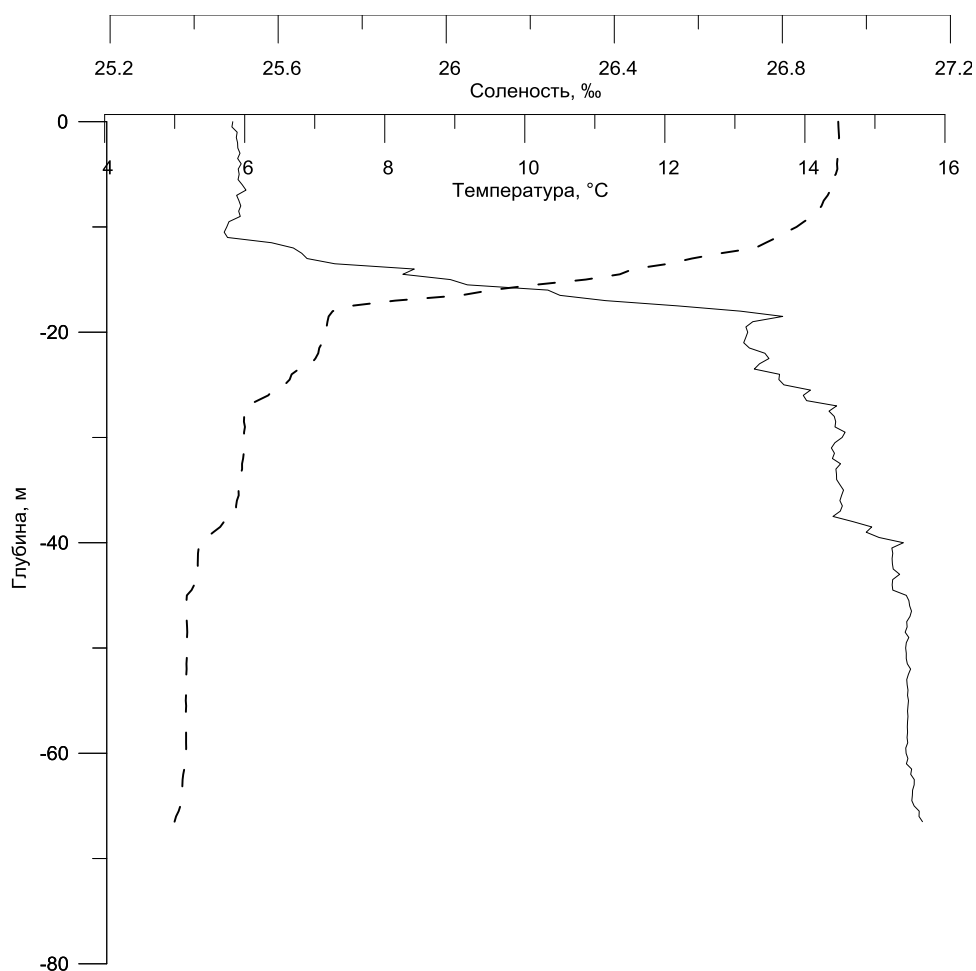


Рисунок 3.2 - Вертикальный профиль солености и температуры, снятых в районе измерений.

Ярким цветом на рисунке 3.1 выделяются значительные повышения скорости с периодом около 12 часов, что соответствует колебаниям приливного цикла. С той же периодичностью мы видим, как происходит процесс вовлечения нижний слоев в турбулентное движение, мы прослеживаем это по голубым и зеленым участкам, скорость которых несколько выше, окружающей ее, средней. Местами, вовлечение происходит до самого дна.

В этой работе верхний слой был отсечен, и данные представляли собой широтные и меридиональные составляющие скорости течения на глубинах от 18,2 до 58,2 метров, что соответствует шкале графика от 41 до 1 соответственно(из-за того, что измерения проводились снизу вверх). В этом слое так же прослеживается два слоя. Первый, который заключен между 30 и 41 метрами(по шкале графика), в большей степени вовлекается в турбулентное движение.

Из рисунка 3.4 видно, что первая полная вода наступает почти в самом начале измерений 15 августа 2013 года в полночь(начало измерений соответствует времени 22:38). Первая малая вода наступает в 6 утра 16 августа 2013 года. Из этого можно сделать вывод, что эти колебания происходят с периодом в 12 часов. В 12 часов ночи и 12 часов дня, постепенно смещаясь из-за несоответствия земных и лунных суток. Период приливной волны M2 составляет 12,42 часа.

По рисунку 3.3 можно определить направление движения приливной волны. В момент, когда $V \approx 0$, а U максимально отрицательна, прилив набегают. Проецируя эти значения скоростей на ось координат, получим вектор направления, что говорит о наборе уровня справа налево.

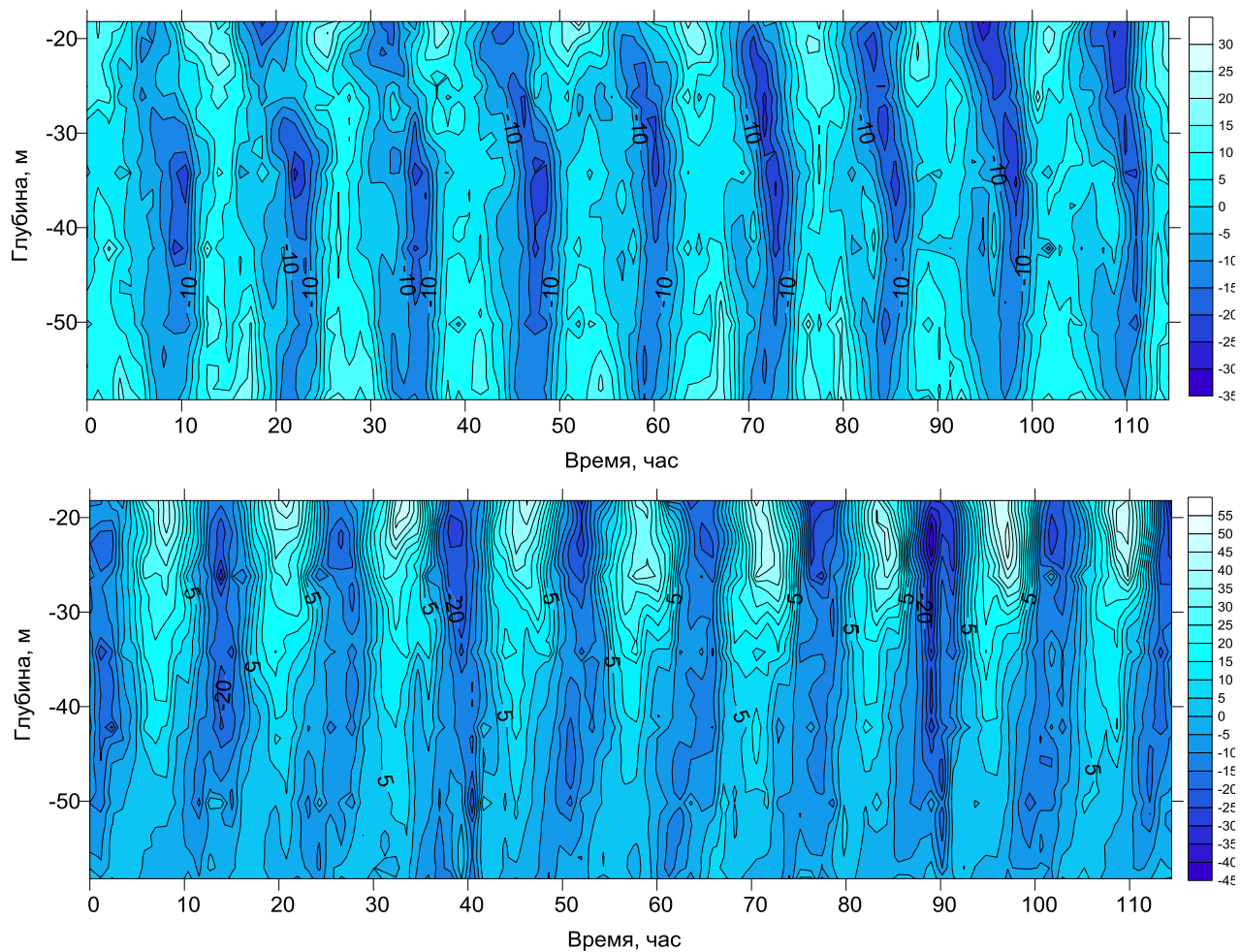


Рисунок 3.3 – Изменчивость широтной(а) и меридиональной(б) составляющей скорости течений с 15 августа 22:38 по 20 августа 19:07 2013 года.

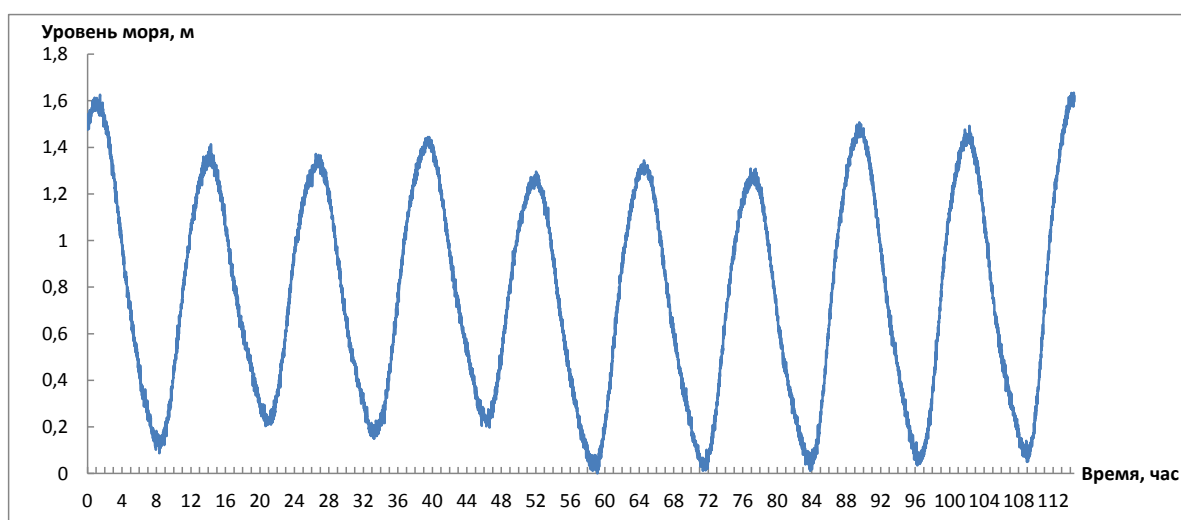


Рисунок 3.4 – Изменчивость уровня с 15 августа 22:38 по 20 августа 19:07 2013 год

Так же, анализируя график хода уровня на рисунке 3.4, можем заметить, что кроме приливных колебаний, там так же явно присутствует некое долгопериодное колебание, значения которого нам поможет определить спектральный анализ.

При анализе данных стоит не забывать, что в начале экспедиционные работы, в результате которой были получены данные, выполнялись в погодных условиях, обусловленных развитием малоподвижного заполняющегося циклона. Большую часть времени волнение не превышало 2 балла, скорость ветра — 6 м/с. С 17 августа через район работ стали проходить атмосферные фронтальные образования, в связи с чем погодные условия стали резко переменчивыми. 17, 19—20 августа отмечались пасмурная погода, осадки, умеренный ветер с усилением до штормового, волнение от 3 баллов и более; 18, 20—21 августа ветер и волнение стихали до штилевого.

3.2 Изменчивость скорости течений в проливе Западная Салма по результатам статистического анализа широтной составляющей скорости

Исходными данными для факторного анализа являлась широтная составляющая (U) скорости течения. Из таблицы 3.1 представлены значения всех факторов, количество которых равно числу переменных (горизонтов). Первые два фактора обеспечивают почти 79,8% вклада в общую дисперсию. Т.е. эти две переменных в наибольшей степени описывают временную изменчивость в широтной составляющей скорости течения для всего профиля. Для дальнейшего исследования они будут выделены в качестве главных компонент. Собственное значение первого фактора равняется 26,77532, его вклад в дисперсию 65,30565%. Значение второго 5,95351 и 14,52075%.

График «каменистой осыпи» (рис. 3.5) представляет визуальную интерпретацию собственных значений факторов, указанных в таблице 3.1. Он

более наглядно показывает вклад в дисперсию двух факторов, выбранных нами ранее. После двух последовательных факторов, наблюдается замедление убывания собственных значений, другими словами, ниже находится «факториальная осыпь». Все последующие факторы включают в себя все меньшую и меньшую изменчивость, поэтому в дальнейшем исследовании использоваться не будут.

Значен.	Собст. значения (Таблица данных1) Выделение: Главные компоненты			
	Собств. Знач.	% общей дисперс.	Кумулятивн. Собств. Знач.	Кумулятивн. %
1	26,77532	65,30565	26,77532	65,3057
2	5,95351	14,52075	32,72883	79,8264
3	2,08962	5,09663	34,81844	84,9230
4	1,62121	3,95417	36,43965	88,8772
5	0,76693	1,87056	37,20658	90,7478
6	0,58603	1,42934	37,79261	92,1771
7	0,47759	1,16485	38,27020	93,3420
8	0,32636	0,79600	38,59656	94,1380
9	0,24100	0,58781	38,83757	94,7258
10	0,19858	0,48434	39,03615	95,2101
11	0,15042	0,36688	39,18657	95,5770
12	0,13181	0,32148	39,31837	95,8985
13	0,11757	0,28677	39,43595	96,1852
14	0,10245	0,24987	39,53840	96,4351
15	0,09736	0,23747	39,63576	96,6726
16	0,08832	0,21542	39,72408	96,8880
17	0,08157	0,19895	39,80565	97,0869
18	0,07598	0,18531	39,88162	97,2723
19	0,07042	0,17177	39,95205	97,4440
20	0,06875	0,16768	40,02080	97,6117
21	0,06250	0,15243	40,08329	97,7641
22	0,06117	0,14919	40,14446	97,9133
23	0,05997	0,14626	40,20443	98,0596
24	0,05694	0,13889	40,26137	98,1985
25	0,05552	0,13541	40,31689	98,3339
26	0,05326	0,12991	40,37015	98,4638
27	0,05138	0,12532	40,42153	98,5891
28	0,05006	0,12210	40,47159	98,7112
29	0,04757	0,11602	40,51916	98,8272
30	0,04737	0,11553	40,56653	98,9428
31	0,04616	0,11259	40,61269	99,0554
32	0,04440	0,10829	40,65709	99,1636
33	0,04347	0,10604	40,70057	99,2697
34	0,04277	0,10432	40,74334	99,3740
35	0,04026	0,09819	40,78360	99,4722
36	0,03931	0,09587	40,82290	99,5681
37	0,03837	0,09359	40,86127	99,6616
38	0,03649	0,08899	40,89776	99,7506
39	0,03609	0,08802	40,93385	99,8387
40	0,03470	0,08463	40,96855	99,9233
41	0,03145	0,07672	41,00000	100,0000

Таблица 3.1 – Собственные значения факторов для широтной составляющей

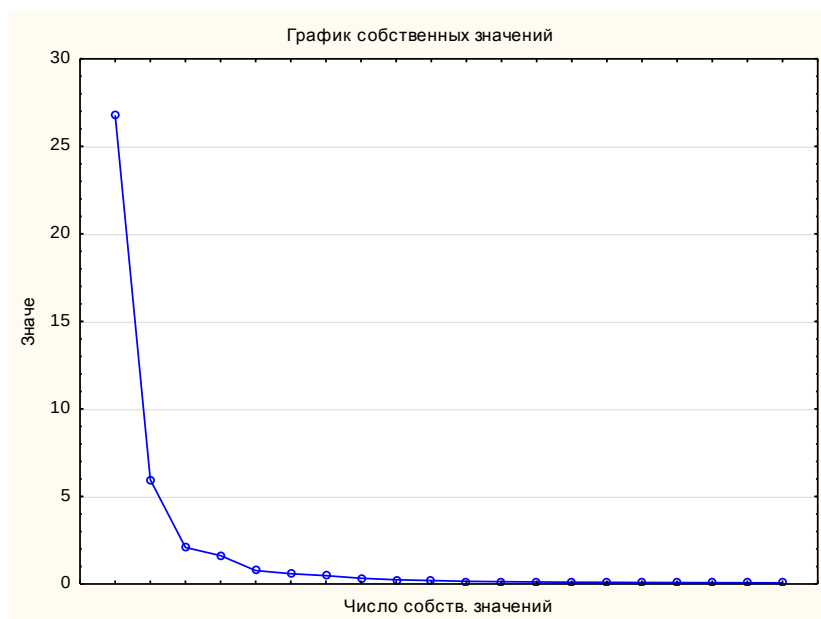


Рисунок 3.5 – График «каменистой осыпи» для широтной составляющей скорости

Факторные нагрузки, представленные в таблице 3.2, характеризуют корреляцию переменных с факторами. В данном случае они факторы определяют широтную составляющую скорости течения для каждого горизонта и в таблице хорошо видно разделение профиля на два слоя, которые условно назовем верхним и нижним. Красным цветом выделены нагрузки, превышающие значения 0,7 по модулю. Первый фактор определяет нижний слой, расположенный между 26,2 до 58,2 метрами. Знак нагрузок говорит об отрицательно связи фактора с переменной. Вторым фактор описывает верхний слой, значения выше 0,7 находятся между 20,2 и 22,2 метрами. Если сопоставить эти значения с графиком исходных данных(рисунок 3.1), можно прийти к выводу, что второй фактор представляет собой новую переменную, характеризующую влияние верхнего турбулентного слоя на нижележащие, а так же их вовлечение в турбулентное движение.

В ходе факторного анализа были получены качественные значения факторных нагрузок. Вращение различными методами не принесли значимых улучшений, поэтому не использовались, чтобы не нарушать метод главных компонент и не искажать выводимые значения поворотом осей.

Перемен	Фактор 1	Фактор 2
18,2	-0,54792	-0,635014
19,2	-0,54625	-0,684432
20,2	-0,54078	-0,719168
21,2	-0,56010	-0,726285
22,2	-0,58989	-0,715320
23,2	-0,62326	-0,681987
24,2	-0,66000	-0,636520
25,2	-0,69088	-0,588982
26,2	-0,71937	-0,530926
27,2	-0,76545	-0,437711
28,2	-0,80822	-0,328585
29,2	-0,84398	-0,215432
30,2	-0,86375	-0,108500
31,2	-0,87314	0,031539
32,2	-0,86527	0,162618
33,2	-0,85700	0,259778
34,2	-0,83806	0,334773
35,2	-0,82530	0,369077
36,2	-0,81399	0,391589
37,2	-0,79948	0,415047
38,2	-0,79631	0,412578
39,2	-0,79621	0,406601
40,2	-0,80655	0,392205
41,2	-0,81956	0,360823
42,2	-0,83460	0,326829
43,2	-0,85156	0,290847
44,2	-0,87260	0,252452
45,2	-0,88424	0,214780
46,2	-0,89313	0,181514
47,2	-0,90042	0,138895
48,2	-0,90693	0,112627
49,2	-0,91313	0,074346
50,2	-0,90628	0,063486
51,2	-0,89903	0,049875
52,2	-0,89214	0,033953
53,2	-0,88610	0,024320
54,2	-0,88109	0,013748
55,2	-0,87295	0,008934
56,2	-0,86515	0,001454
57,2	-0,85812	-0,001778
58,2	-0,84945	-0,003565
Общая. Д	26,77532	5,953508
Доля общ	0,65306	0,145208

Таблица 3.2 – Факторные нагрузки факторов для широтной составляющей скорости

Для графического отображения факторных нагрузок для них был построен график и проведены нелинейные тренды. На оси X нанесена глубина измерений, ось Y – это шкала значений нагрузок. Все значения первого фактора являются отрицательными, большая часть линии нагрузки опущена ниже уровня $-0,7$ и распределена равномерно, удерживаясь в одном уровне, отражая хорошую стратификацию вод.

Кривая второго фактора начинается с отрицательных значений, описывая вовлечение в турбулентное движение верхнего слоя вод, после чего значения нагрузки возрастают, меняя знак на противоположный. Максимальное положительное значение достигается на глубине в $37,2$ метра, после чего значения нагрузок снова идут на убыль к отрицательным значениям.

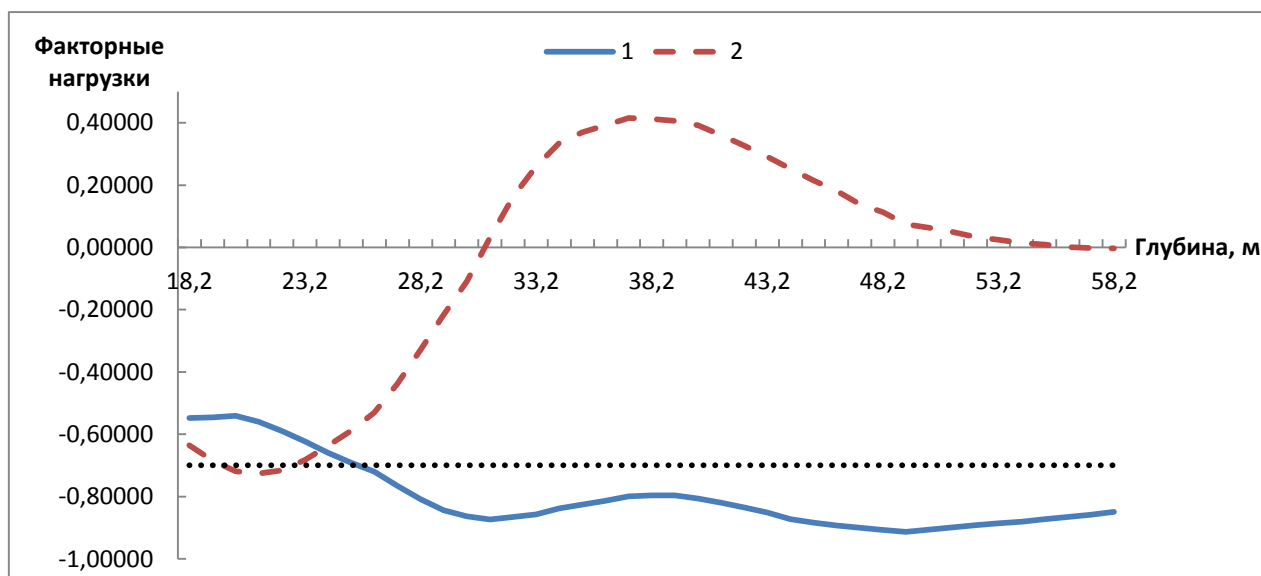


Рисунок 3.6 – График факторных нагрузок для широтной составляющей скорости: 1 – первый фактор; 2 – второй фактор

Для дальнейшего анализа были выделены действительные значения первого фактора для каждого наблюдения (рисунок 3.7). Минимальное

значение фактора $-2,374$ приходится 16 августа 2013 года в 12:59, максимальное значение $2,342$ приходится на 18 августа 2013 года в 22:23. Изменения значений фактора отражают наличие колебаний приливного цикла(12 часов). На эти колебания накладываются более короткопериодные вариации, для их выделения использовался спектральный анализ.

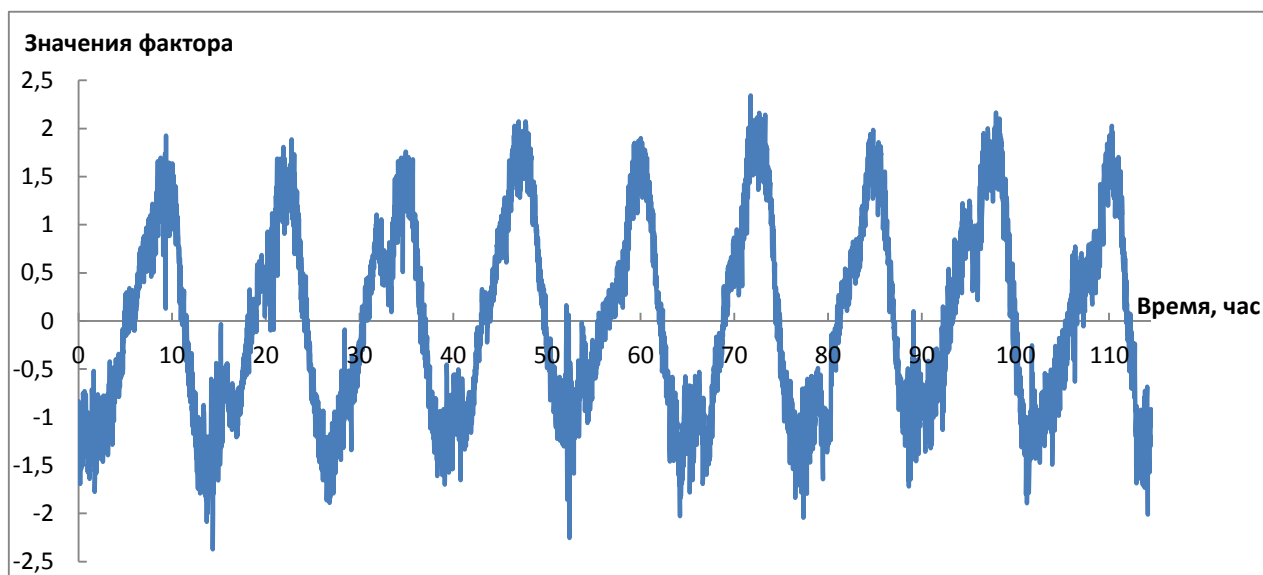


Рисунок 3.7 – График значений первого фактора для широтной составляющей скорости

На рисунке 3.8 (а) показан спектр ряда значений фактора №1 широтной скорости течения, на котором видно наиболее выражены колебания с приливным полусуточным периодом 744,7 минут (12 часов). Все прочим пикам соответствуют небольшие значения спектральной плотности. Второй по высоте пик периодограммы соответствует долгопериодному колебанию 4096 минут(68 часов). За ним следуют колебания с периодом 1365,3 минуты(22,7 часов) и 546,1 минуты(9 часов). Чтобы выделить колебания с меньшим периодом воспользуемся рисунком 3.8 (б), на котором представлена короткопериодная часть спектра. Множественные пики с малыми значениями

периодограммы слабо выражают колебания внутри приливного периода, соответствующего гармонике M2.

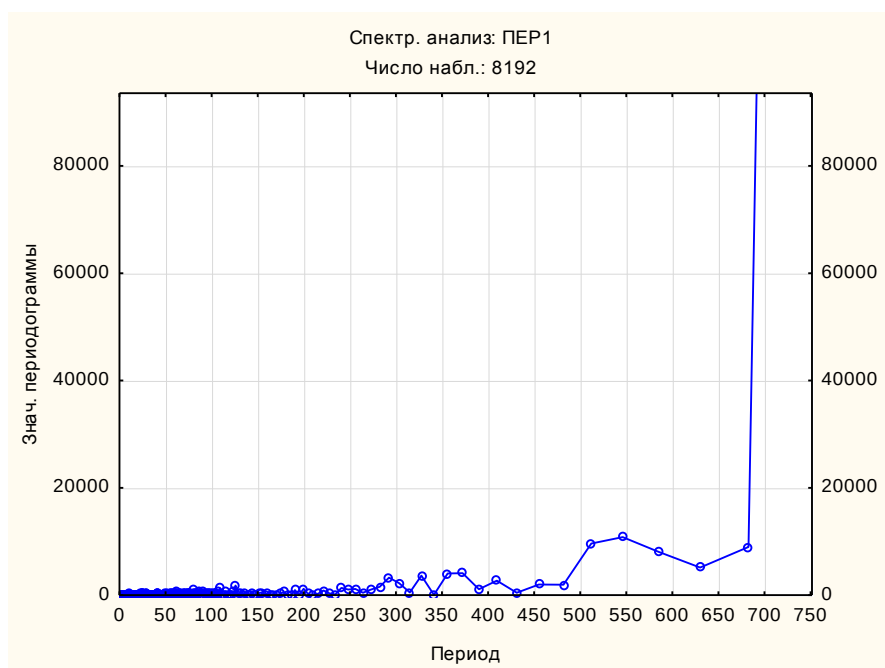
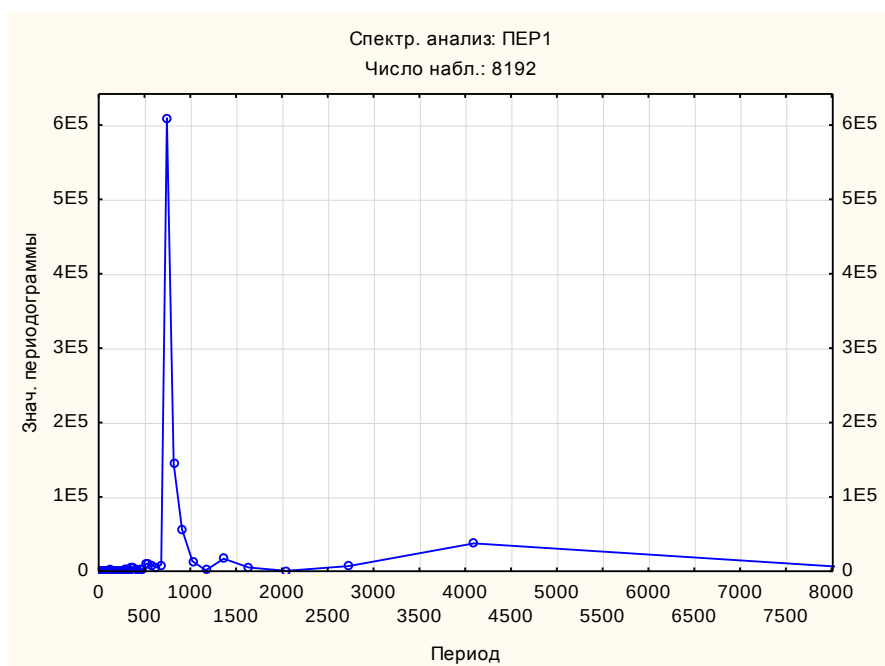


Рисунок 3.8– Спектр ряда значений первого фактора широтной скорости течения (а) и его короткопериодная часть (б)

На рисунке 3.9 представлены действительные значения второго фактора для каждого наблюдения. Минимальное значение фактора -2,641 приходится

17 августа 2013 года в 22:23, максимальное значение 3,194 приходится на 20 августа 2013 года в 10:50. Изменения значений фактора отражает колебание приливного цикла(12 часов), но его амплитуда в начале измерений несколько меньше, после чего она возрастает. Так же на графике заметна тенденция к постепенному повышению среднего значения фактора. На приливную гармонику накладываются более короткопериодные вариации, и для их выделения так же использовался спектральный анализ.

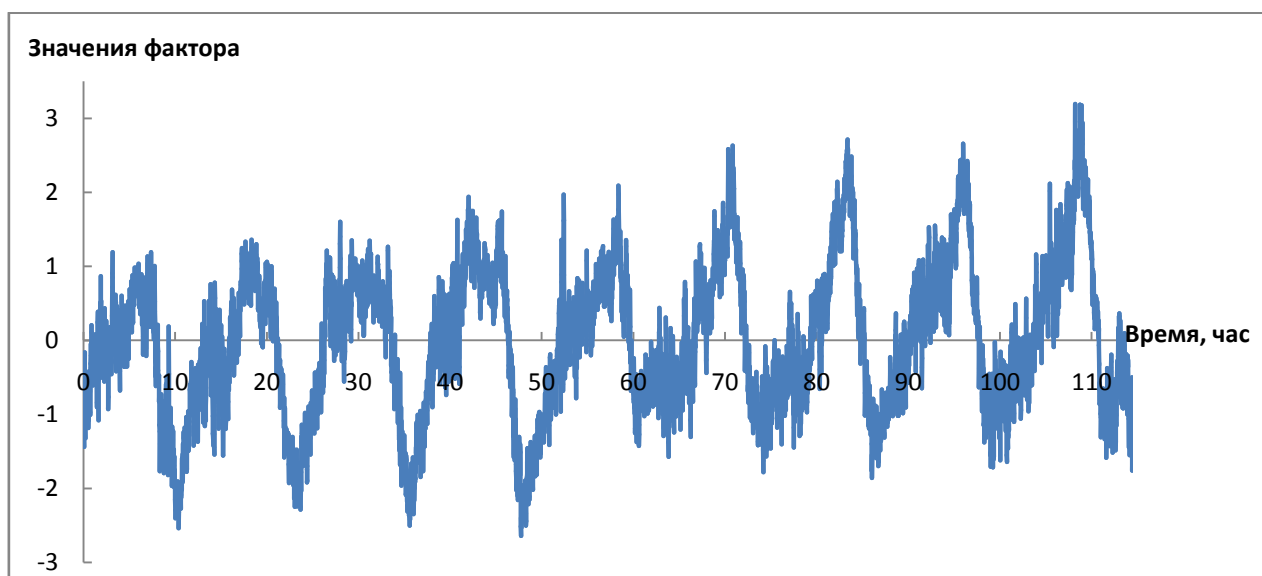


Рисунок 3.9 – График значений второго фактора для широтной составляющей скорости

На рисунке 3.10 (а) показан спектр ряда значений второго фактора широтной скорости течения, на котором видно наиболее выражены колебания с приливным полусуточным периодом 744,72 минут (12,4 часов). Второй по высоте пик периодограммы соответствует колебанию с периодом 390,09 минут(6,5 часов). Чтобы выделить колебания с меньшим периодом воспользуемся рисунком 3.10 (б), на котором представлена короткопериодная часть спектра. На ней хорошо прослеживаются колебания с периодами 248,5(4,14 часа) и 190,5(3,17 часа).

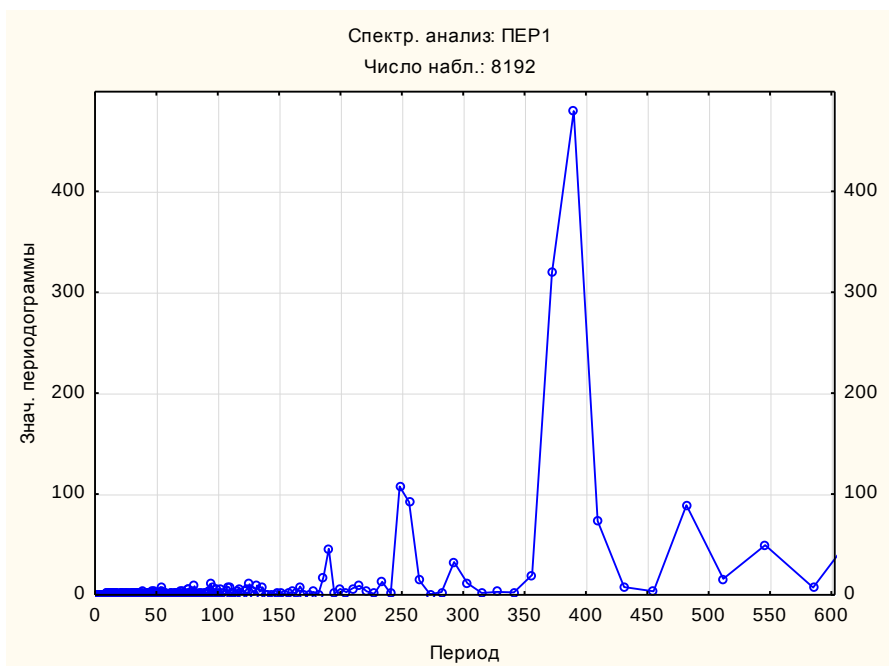
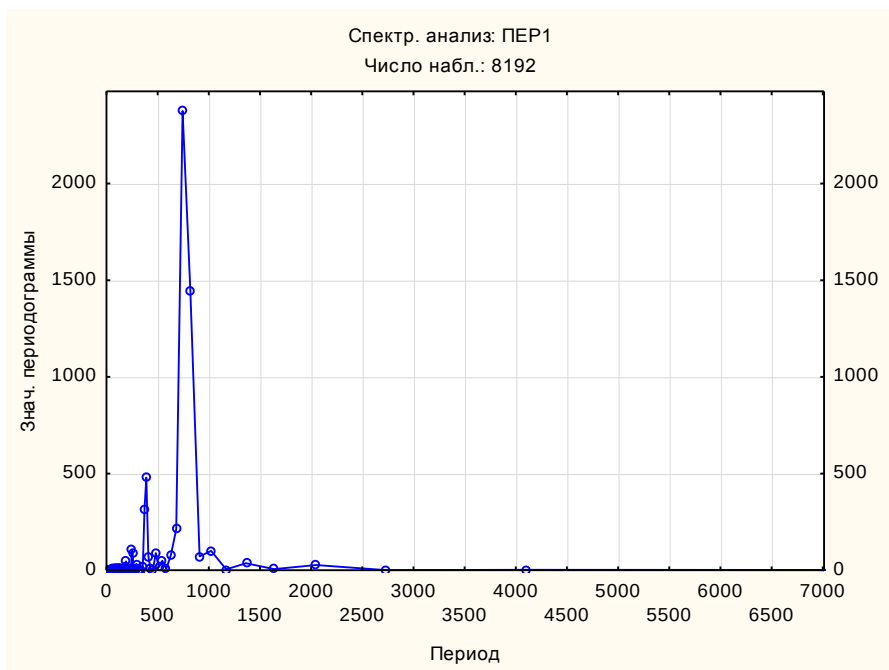


Рисунок 3.10– Спектр ряда значений второго фактора широтной скорости течения (а) и его короткопериодная часть (б)

Анализируя итоги факторного анализа, мы выделили две водные массы, описываемые разными факторами. Спектральный анализ показал, что первый

фактор представляет собой переменную, характеризующую изменчивость широтной составляющей течений в глубинном слое от 26,2 до 58, 2 метров. Этот слой в наибольшей степени подвержен действию полусуточного приливного цикла M2, колебания внутри этого цикла были выражены плохо. Колебание с периодом 4096 минут (68 часов) может соответствовать тому самому долгопериодному колебанию, которое мы заметили на рисунке 3.4.

Второй фактор соответствует слою между 20,2 и 22,2 метрами глубины. Спектральный анализ выявил полусуточную приливную волну M2 с периодом 744,72 минут (12,4 часов), мелководный $\frac{1}{4}$ суточный прилив M4 с периодом 390,09 минут (6,5 часов) и колебания с периодом 248, 5 (4,14 часа), что вполне может соответствовать деформированным $\frac{1}{6}$ суточным мелководным приливам M6, которые встречаются в том районе Белого моря (см. рис 1.3).

3.3 Изменчивость скорости течений в проливе Западная Салма по результатам статистического анализа меридиональной составляющей скорости

Исходными данными для факторного анализа являлась меридиональная составляющая (V) скорости течения. Из таблицы 3.3 представлены значения всех факторов, количество которых равно числу переменных (горизонтов). Первые два фактора обеспечивают только 58,5% вклада в общую дисперсию. Т.е. эти две переменных в наибольшей степени описывают временную изменчивость в меридиональной составляющей скорости течения для всего профиля. Для дальнейшего исследования они будут выделены в качестве главных компонент. Собственное значение первого фактора равняется 16,50171, его вклад в дисперсию 40,24086%. Значение второго 7,50207 и 18,29773%. У третьего фактора так же значимый вклад в дисперсию, более 9% при собственных значениях равных 3,98543.

Значен.	Собст. значения (Таблица данных1) Выделение: Главные компоненты			
	Собств. Знач.	% общей дисперс.	Кумулятив н. Собств. Знач.	Кумулятив н. %
1	16,50171	40,24806	16,50171	40,2481
2	7,50207	18,29773	24,00377	58,5458
3	3,98543	9,72056	27,98920	68,2664
4	1,86308	4,54410	29,85229	72,8105
5	1,14292	2,78760	30,99520	75,5981
6	0,90878	2,21653	31,90398	77,8146
7	0,72121	1,75906	32,62520	79,5736
8	0,69560	1,69659	33,32080	81,2702
9	0,64676	1,57747	33,96756	82,8477
10	0,57664	1,40644	34,54420	84,2542
11	0,52649	1,28413	35,07070	85,5383
12	0,45861	1,11857	35,52931	86,6569
13	0,42071	1,02611	35,95002	87,6830
14	0,38063	0,92836	36,33064	88,6113
15	0,34394	0,83888	36,67458	89,4502
16	0,32379	0,78972	36,99837	90,2399
17	0,29417	0,71749	37,29254	90,9574
18	0,27334	0,66668	37,56588	91,6241
19	0,25193	0,61447	37,81781	92,2386
20	0,23711	0,57832	38,05492	92,8169
21	0,22450	0,54756	38,27942	93,3645
22	0,20917	0,51017	38,48859	93,8746
23	0,20527	0,50066	38,69387	94,3753
24	0,19812	0,48322	38,89199	94,8585
25	0,18129	0,44217	39,07327	95,3007
26	0,17249	0,42070	39,24576	95,7214
27	0,16716	0,40770	39,41292	96,1291
28	0,16180	0,39465	39,57472	96,5237
29	0,14768	0,36019	39,72240	96,8839
30	0,14122	0,34443	39,86362	97,2283
31	0,13246	0,32307	39,99608	97,5514
32	0,12751	0,31099	40,12358	97,8624
33	0,12240	0,29853	40,24598	98,1609
34	0,11283	0,27519	40,35881	98,4361
35	0,10885	0,26550	40,46766	98,7016
36	0,10431	0,25441	40,57197	98,9560
37	0,09793	0,23885	40,66990	99,1949
38	0,09014	0,21986	40,76004	99,4147
39	0,08393	0,20472	40,84398	99,6195
40	0,08167	0,19920	40,92565	99,8187
41	0,07435	0,18135	41,00000	100,0000

Таблица 3.3 – Собственные значения факторов для меридиональной скорости

График «каменистой осыпи» представляет визуальную интерпретацию собственных значений факторов, указанных в таблице 3.3. Он наглядно показывает вклад в дисперсию трех факторов, описанных нами ранее. После трех последовательных факторов, наблюдается замедление убывания собственных значений, другими словами, ниже находится «факториальная осыпь». Все последующие факторы включают в себя все меньшую и меньшую изменчивость, поэтому в дальнейшем исследовании использоваться не будут.

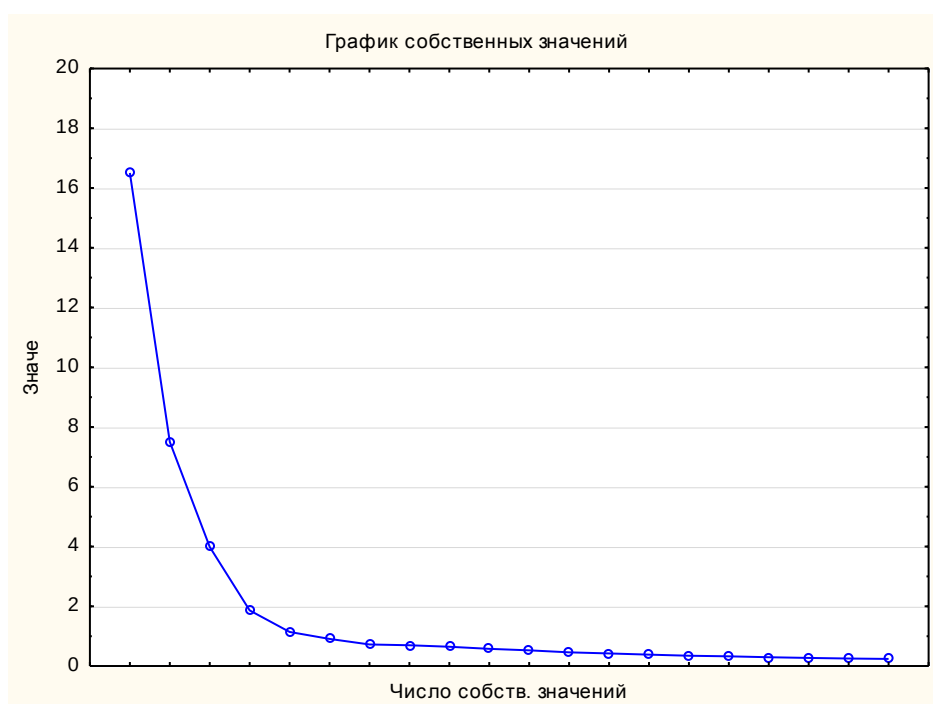


Рисунок 3.11 – График «каменистой осыпи» для меридиональной составляющей скорости

Факторные нагрузки, представленные в таблице 3.4, характеризуют корреляцию переменных с факторами. В данном случае они факторы определяют меридиональную составляющую скорости течения для каждого горизонта. В этой таблице не так хорошо видно разделение профиля на слои, как у широтной составляющей. Красным цветом выделены нагрузки, превышающие значения 0,7 по модулю. Следуя этим значениям, первый

фактор определяет нижний слой, расположенный между 34,2 до 51,2 метрами. Он несколько уже того, что был у широтной составляющей. Для второго и третьего фактора нагрузки на всем профиле не достигают критического значения 0,7 и в недостаточной мере описывают изменчивость меридиональной скорости. Они не подходят для дальнейшего исследования, поэтому их значения не будут использоваться для спектрального анализа. Наибольшие по модулю значения второго фактора расположены в верхнем слое, максимум нагрузок достигается на горизонте 24,2 метра. Положительный знак нагрузок в этом слое говорит о прямой связи фактора с переменными, что противоположно полученным результатам с широтной составляющей. Второй фактор, как новая переменная, характеризующую влияние верхнего турбулентного слоя на нижележащие слои и их вовлечение в турбулентное движение, плохо выражен. Нагрузки третьего фактора так же невелики и ни на одном горизонте не превышают по модулю значения 0,7. Наибольшие нагрузки приходятся на придонный слой и они так же имеют положительные значения. Максимальная нагрузка наблюдается на 56,2 метрах. Латентная переменная, должна была описывать изменчивость меридиональной скорости в придонном слое, но в этой модели ее выраженность слабая.

Перемен	Фактор 1	Фактор 2	Фактор3
18,2	-0,03806	0,433525	0,388959
19,2	-0,06903	0,496875	0,447482
20,2	-0,09865	0,533198	0,484151
21,2	-0,12707	0,575659	0,458824
22,2	-0,18401	0,609646	0,432218
23,2	-0,23380	0,607476	0,390665
24,2	-0,27076	0,617707	0,346511
25,2	-0,32117	0,611024	0,287604
26,2	-0,37816	0,580775	0,212424
27,2	-0,44870	0,547190	0,180628
28,2	-0,48708	0,535133	0,126686
29,2	-0,54349	0,520109	0,046924
30,2	-0,56089	0,521223	0,004678
31,2	-0,60932	0,487154	-0,060437
32,2	-0,63933	0,458090	-0,112038
33,2	-0,68481	0,416522	-0,147378
34,2	-0,72444	0,357023	-0,193886
35,2	-0,75632	0,297686	-0,232970
36,2	-0,78386	0,248634	-0,263135
37,2	-0,80380	0,182086	-0,281960
38,2	-0,82736	0,117569	-0,286998
39,2	-0,83182	0,074377	-0,300335
40,2	-0,84388	0,015204	-0,302941
41,2	-0,84999	-0,035692	-0,299359
42,2	-0,85889	-0,075633	-0,271585
43,2	-0,86188	-0,129028	-0,236879
44,2	-0,85702	-0,173828	-0,198399
45,2	-0,85085	-0,219389	-0,151269
46,2	-0,83998	-0,269418	-0,096679
47,2	-0,82783	-0,309136	-0,033264
48,2	-0,80910	-0,353176	0,034897
49,2	-0,78948	-0,387123	0,107962
50,2	-0,75714	-0,426336	0,180242
51,2	-0,72732	-0,450877	0,247717
52,2	-0,68715	-0,474201	0,328126
53,2	-0,63321	-0,498727	0,408410
54,2	-0,57483	-0,506329	0,474871
55,2	-0,51171	-0,498364	0,521546
56,2	-0,44374	-0,494125	0,539783
57,2	-0,37342	-0,469110	0,539379
58,2	-0,28974	-0,408697	0,504660
Общая. Д	16,50171	7,502068	3,985431
Доля общ	0,40248	0,182977	0,097206

Таблица 3.4 – Факторные нагрузки для меридиональной скорости

Для графического отображения факторных нагрузок для них был построен график (рисунок 3.12) и проведены нелинейные тренды. На оси X нанесена глубина измерений, ось Y – это шкала значений нагрузок. Значения нагрузок фактора по модулю увеличиваются с глубиной и часть кривой нагрузки опускается ниже уровня $-0,7$, после чего снова уменьшается.

Внешне кривая второго фактора сходна с первым, но начинается с положительных значений, быстро достигая по модулю максимума, после чего значения нагрузки падают, пересекая ось X. Прямая связь меняется на обратную. Знак меняется на противоположный, нагрузки вновь возрастают по модулю, достигая максимальных значений на глубине 54,2, и принимают значение $-0,506$. Максимальное положительное значение 0,617 достигается на глубине в 24,2 метра, после чего значения нагрузок снова идут на убыль к отрицательным значениям.

Третий фактор по форме отличен от первых двух. Его максимумы положительных нагрузок приходятся на самый верхний и самый нижний слои, между которыми они падают, опуская в отрицательные значения. Но модульные значения обратной связи несколько меньше тех положительных значений, что находятся верхнем и придонном слое. Максимальная нагрузка наблюдается на глубине 57,2 метра и равна 0,539.

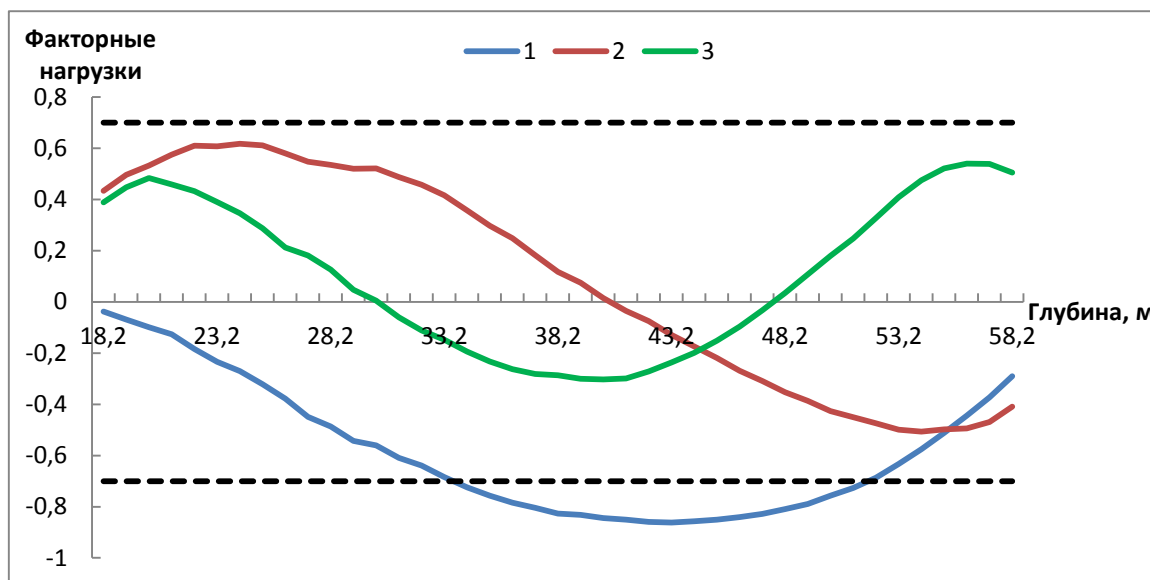


Рисунок 3.12 – График факторных нагрузок для меридиональной скорости: 1 – первый фактор; 2 – второй фактор; 3 – третий фактор

На рисунке 3.13 представлены действительные значения первого фактора для каждого наблюдения. По резкие сильным скачкам скорости значений фактора слабо прослеживаются колебания приливного цикла. На них накладываются короткопериодные вариации колебаний, визуально не имеющие четко выраженного периода и больше напоминающие белый шум, что вынуждает нас проверить эту гипотезу. Амплитуда колебаний постоянно меняется, то возрастаая, то убывая.

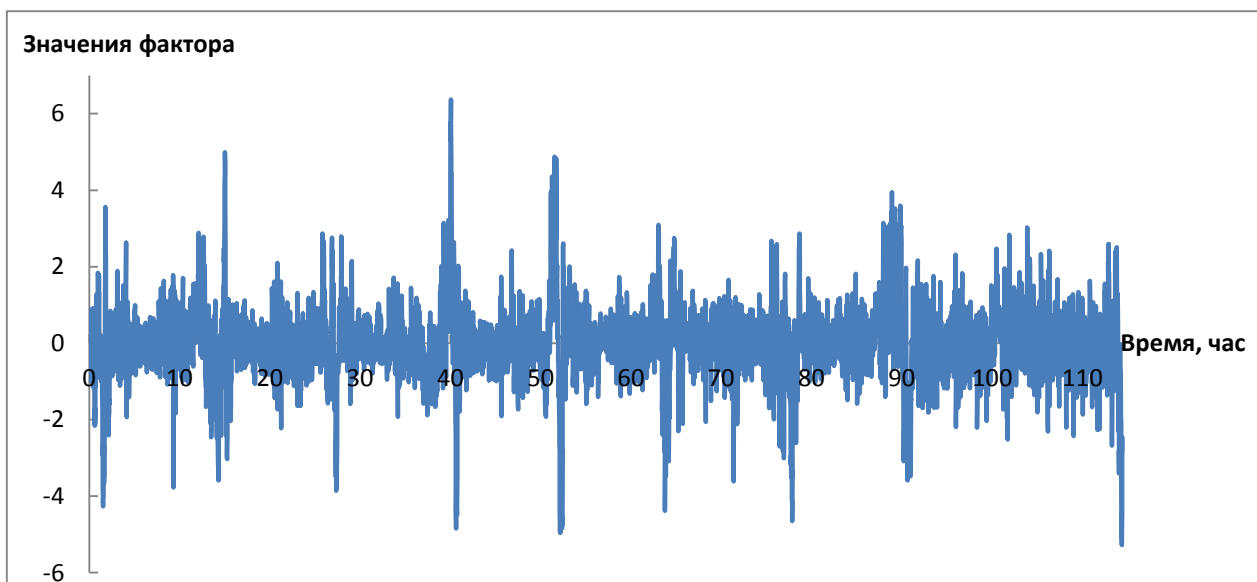


Рисунок 3.13 – График значений первого фактора меридиональной составляющей скорости.

На рисунке 3.14 (а) показан спектр ряда значений первого фактора меридиональной скорости течения, на котором явно преобладают очень частые короткопериодные колебания. Первые четыре пика с максимальным значением периодограммы соответствуют периодам в 136,5 минут(2,27 часа), 115,38 минут(1,9 часа), 167,18 минут(2,78 часа), 273,06(4,5 часа), которые могли быть связаны с субмезомасштабными вихрями и внутренними волнами. Чтобы рассмотреть их лучше воспользуемся рисунком 3.14 (б), на котором представлена короткопериодная часть спектра. Так же стоит выделить две гармоники, соответствующие периодам 409,6 минут(6,8 часа), 356,17(5,9 часа). Приливная гармоника не выражена, ближайший к ней пик соответствует периоду в 682 минуты(11,36 часа). На рисунке 3.14 (а) можно выделить три гармоники с продолжительным периодом, соответствующим 1170,28 минутам(19,5 часа) и 910,22 минутам(15,17 часа). Такое распределение спектров не оставляет возможным составить качественную оценку субприливной изменчивости по данным меридиональной составляющей скорости. По итогам спектрального анализа периоде приливной волны

М2содержится множество короткопериодных пиков от нескольких минут до нескольких часов, которые могут быть вызваны совершенно различными процессами.

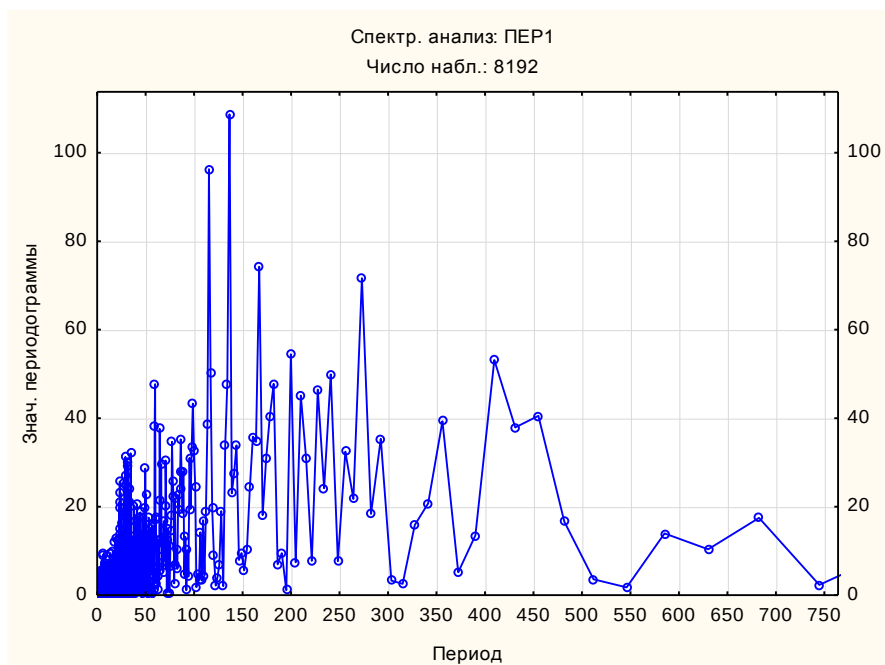
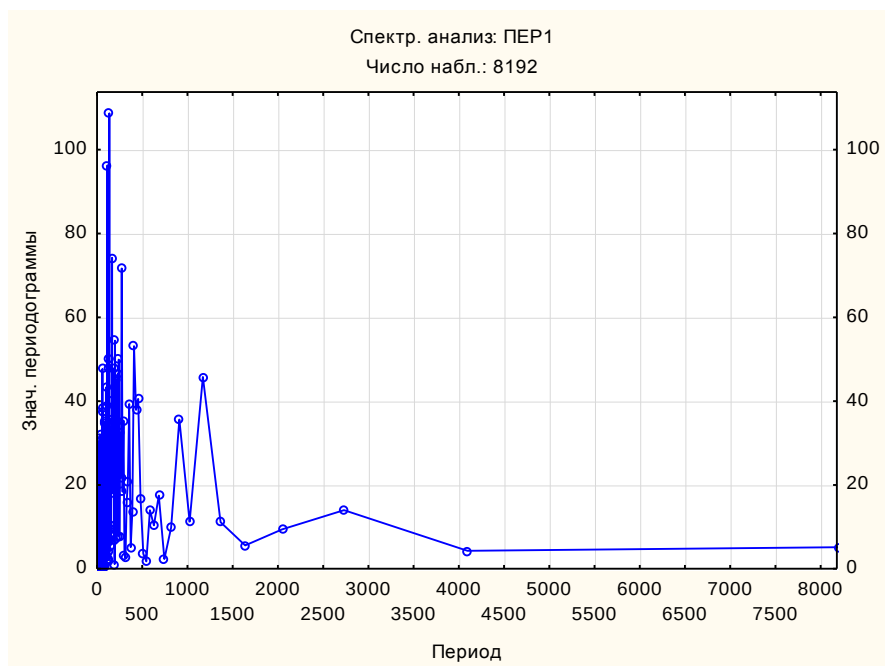


Рисунок 3.14– Спектр ряда значений фактора №2 меридиональной скорости течения (а) и его короткопериодная часть (б)

Для решения вопроса о значимости пиков, о принадлежности белому/красному шуму, была проверка на значимость, опровергнувшая гипотезу о шуме. Таким образом генеральный(первый) фактор описывает мезомасштабные процессы в среднем слое, возбудители которых нам не известны и нуждаются в дальнейшем изучении.

Так как факторные нагрузки второго и третьего фактора оказались незначимыми, было принято решение использовать вращение, с целью увеличения факторных нагрузок, для дальнейшего исследования верхнего и придонного слоя.

Значен.	Собст.значения (Таблица данных1) Выделение: Главные компоненты			
	Собств. Знач.	% общей дисперс.	Кумулятив н. Собств. Знач.	Кумулятив н. %
1	16,50171	40,24806	16,50171	40,24806
2	7,50207	18,29773	24,00377	58,54579
3	3,98543	9,72056	27,98920	68,26635

Таблица 3.5 – Собственные значения факторов для меридиональной скорости после вращения варимакс

Перемен	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
18,2	-0,11549	0,572140	0,000315
19,2	-0,11189	0,662707	0,013797
20,2	-0,10147	0,719223	0,029269
21,2	-0,05871	0,744715	0,001451
22,2	0,00759	0,769557	-0,008142
23,2	0,07099	0,755773	-0,008701
24,2	0,12660	0,747200	-0,024661
25,2	0,19904	0,720071	-0,033091
26,2	0,28248	0,666675	-0,034264
27,2	0,35410	0,638740	0,000463
28,2	0,41312	0,607403	-0,007449
29,2	0,50048	0,563187	-0,021011
30,2	0,53744	0,543941	-0,039772
31,2	0,60789	0,491299	-0,036474
32,2	0,65642	0,445989	-0,036681
33,2	0,70778	0,403844	-0,011550
34,2	0,75773	0,339847	0,014575
35,2	0,79729	0,278407	0,041499
36,2	0,82987	0,229126	0,065682
37,2	0,84781	0,170829	0,103896
38,2	0,86181	0,122885	0,151309
39,2	0,86691	0,082406	0,171279
40,2	0,87067	0,037336	0,211380
41,2	0,86726	0,000904	0,247458
42,2	0,85493	-0,012401	0,293469
43,2	0,83221	-0,033682	0,349109
44,2	0,80206	-0,047905	0,398092
45,2	0,76614	-0,058078	0,452333
46,2	0,72178	-0,068584	0,511685
47,2	0,67306	-0,066242	0,569715
48,2	0,61574	-0,066124	0,630139
49,2	0,55643	-0,055483	0,687099
50,2	0,48614	-0,052427	0,740558
51,2	0,42242	-0,040020	0,783333
52,2	0,34335	-0,021686	0,828457
53,2	0,25262	-0,007614	0,867527
54,2	0,16763	0,010760	0,885484
55,2	0,09109	0,028880	0,879255
56,2	0,02492	0,026625	0,855044
57,2	-0,03072	0,029423	0,805373
58,2	-0,07494	0,037159	0,706162
Общая. Д	12,89516	6,846690	8,247353
Доля общ	0,31452	0,166992	0,201155

Таблица 3.6 – Факторные нагрузки для меридиональной составляющей после вращения варимакс

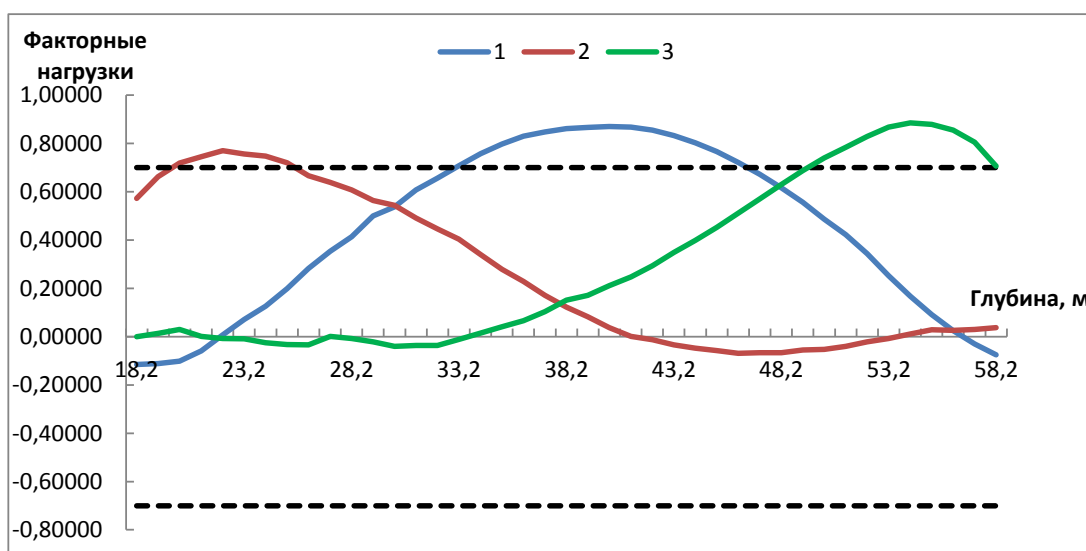


Рисунок 3.15 – график факторных нагрузок: 1 – первый фактор; 2 – второй фактор; 3 – третий фактор

Сравнивая рисунки 3.12 рисунке 3.15, где представлены действительные значения первого фактора для каждого наблюдения, можно сделать те же выводы. По резким сильным скачкам скорости значений фактора слабо прослеживаются колебания приливного цикла. На них накладываются короткопериодные вариации колебаний, визуальнo не имеющие четко выраженной периодичности. Амплитуда колебаний постоянно меняется.

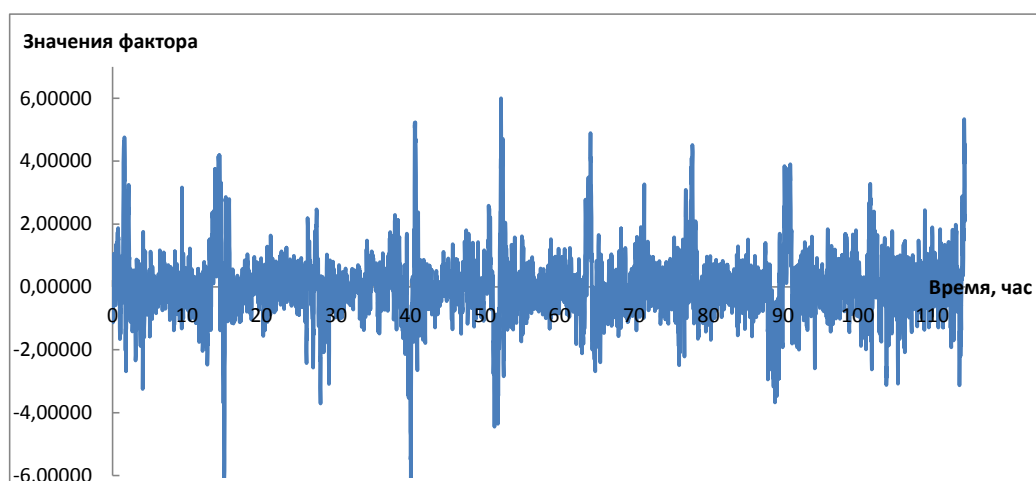


Рисунок 3.16 – График значений фактора №1 меридиональной составляющей скорости после вращения варимакс.

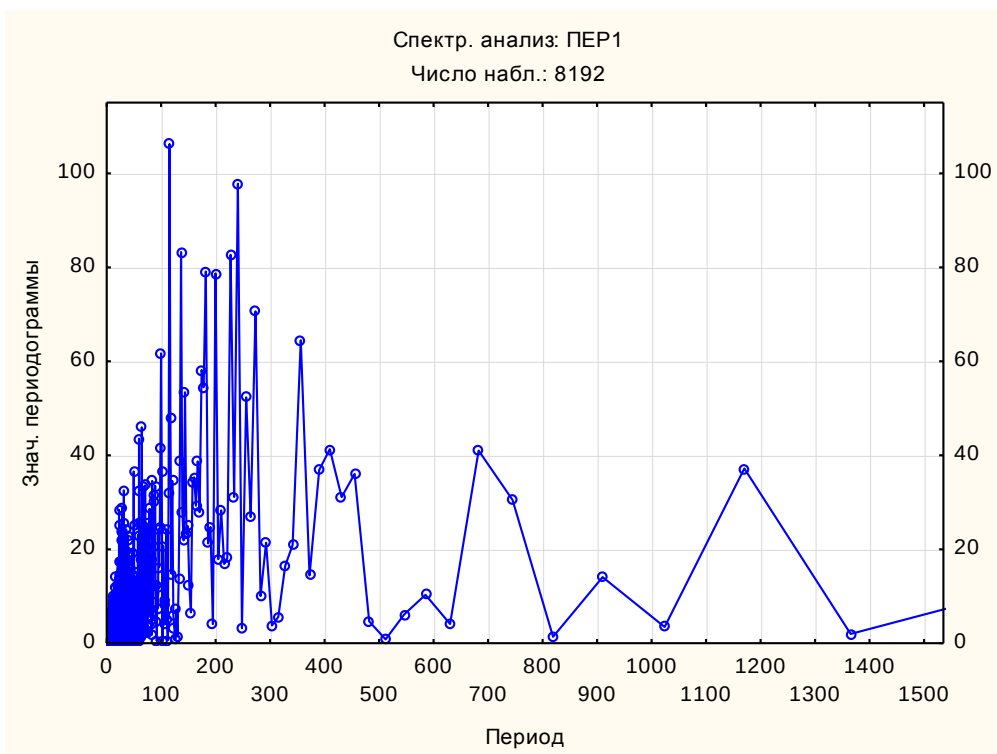
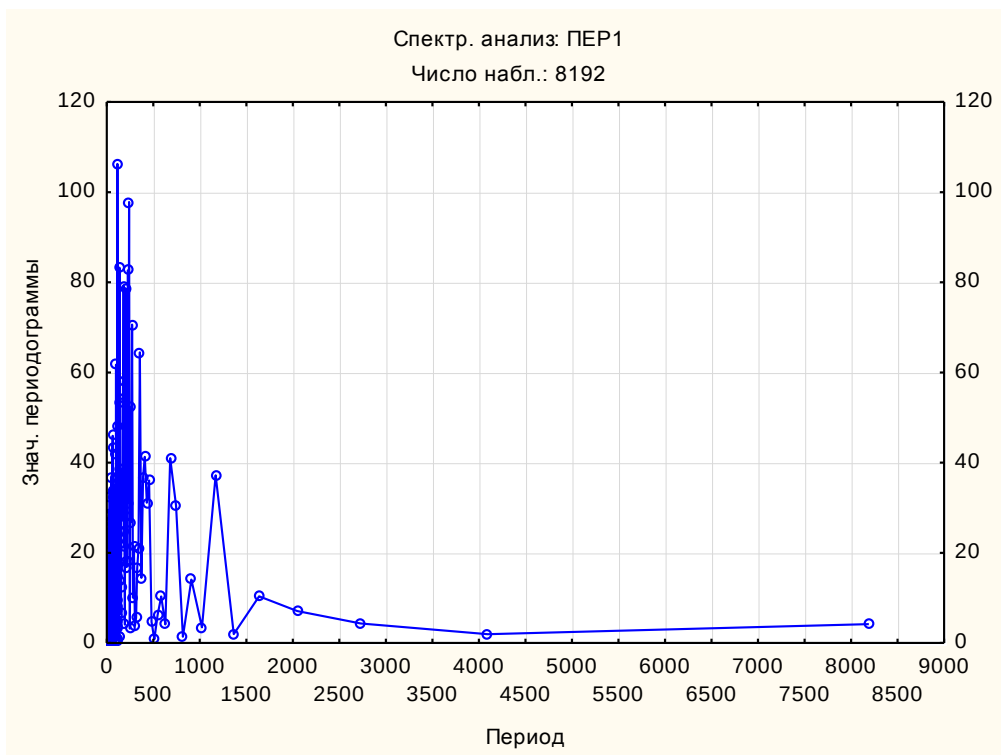


Рисунок 3.17 – Спектр ряда значений первого фактора меридиональной скорости течения (а) и его короткопериодная часть (б) после вращения варимакс

На рисунке 3.17 (а) показан спектр ряда значений первого фактора меридиональной скорости течения, на котором после вращения точно так же явно преобладают частые короткопериодные колебания. В периоде приливной волны М2 содержится множество короткопериодных пиков от нескольких минут до нескольких часов, которые могут быть вызваны совершенно различными процессами. Первые пять пиков с максимальным значением периодограммы соответствуют периодам в 115,38 минут (1,9 часа), 240,9 минут (4 часа), 136,5 минут (2,3 часа), 227,5 минут (3,8 часа), 184,04 минуты (3 часа), которые могли быть связаны с субмезомасштабными вихрями и внутренними волнами. Колебание с периодом 4 часа так же может соответствовать 1/6 суточного прилива волны М6. Чтобы рассмотреть все эти гармоники лучше, воспользуемся рисунком 3.17 (б), на котором представлена короткопериодная часть спектра. Приливная гармоника выражена плохо, ближайший к ней пик с периодом 682,6 минут (11,3 часа) имеет более низкие значения спектральной плотности, чем короткопериодная часть.

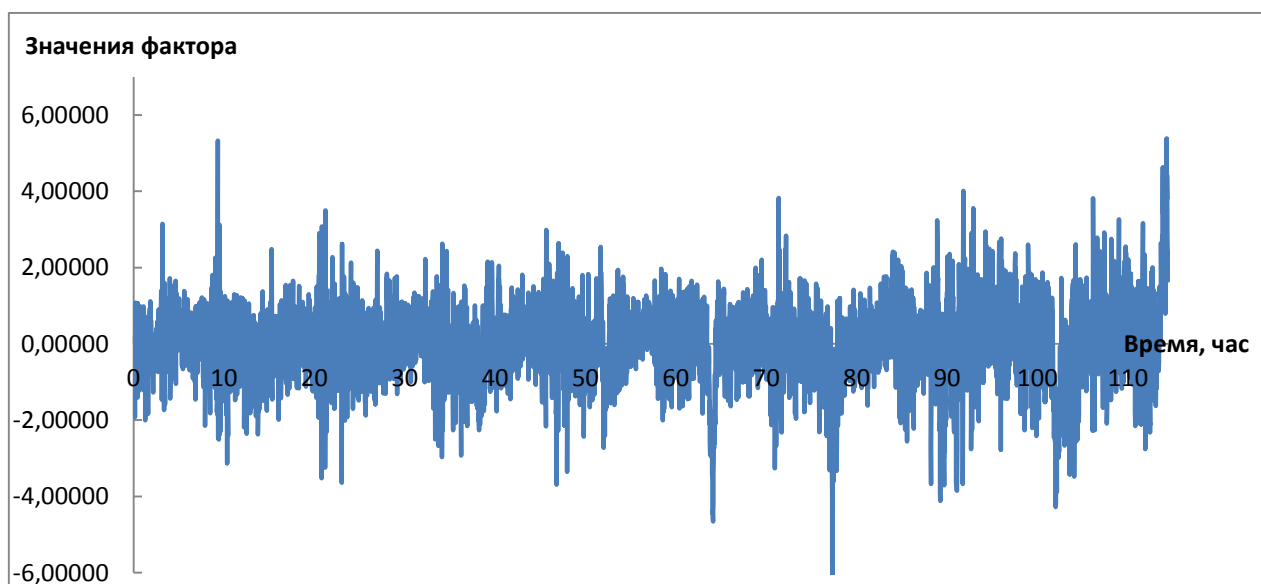


Рисунок 3.18 – График значений фактора №2 меридиональной составляющей скорости после вращения варимакс.

На рисунке 3.18 предоставлен график значений второго фактора меридиональной составляющей. Как и у первого, изменения значений фактора слабо отражают колебания приливного цикла, из-за сильного влияния короткопериодных колебаний, визуально не имеющих четко выраженной периодичности. Амплитуда колебаний так же непостоянна на протяжении всей выборки.

Что бы выделить периоды колебаний, воспользуемся результатами спектрального анализа, предоставленного виде спектрограммы на рисунке 3.19(а). На ней мы видим, что верхний слой, описываемый вторым фактором, подвержен приливным полусуточным колебаниям. Полуприливная гармоника M2 с периодом 744,7 минут(12,4 часа) ярко выражена и имеет максимальные значения. Следующие четыре значимых пика имеют периоды 264,2 минуты(4,4 часа), 1356,33 минут (22,8 часа), 85,3 минуты(1,4 часа), 190,5 минут(3,17 часа). Колебание с периодом 4,4 часа, как и в случае первого фактора, может соответствовать мелководному 1/6 суточному приливу волны M6.

Мелкомасштабные колебания, которые хорошо видны на рисунке 3,19(б) имеют периоды от 1 до 7 часов. Они описывают внутренние волны, мезомасштабные процессы в океане, а так же процесс турбулентного вовлечения турбулизированного слоя, который был предварительно удален.

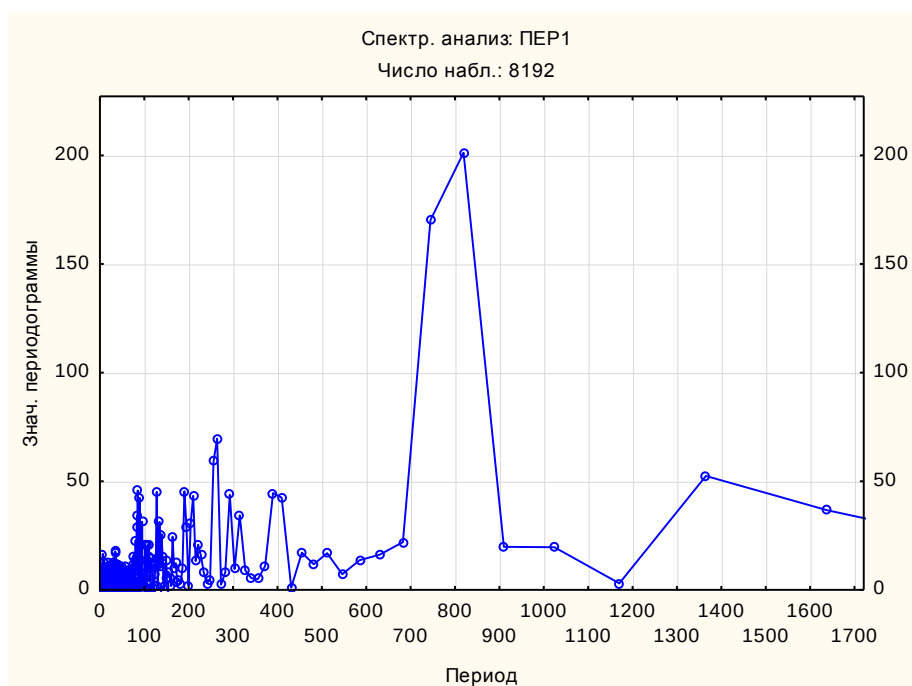
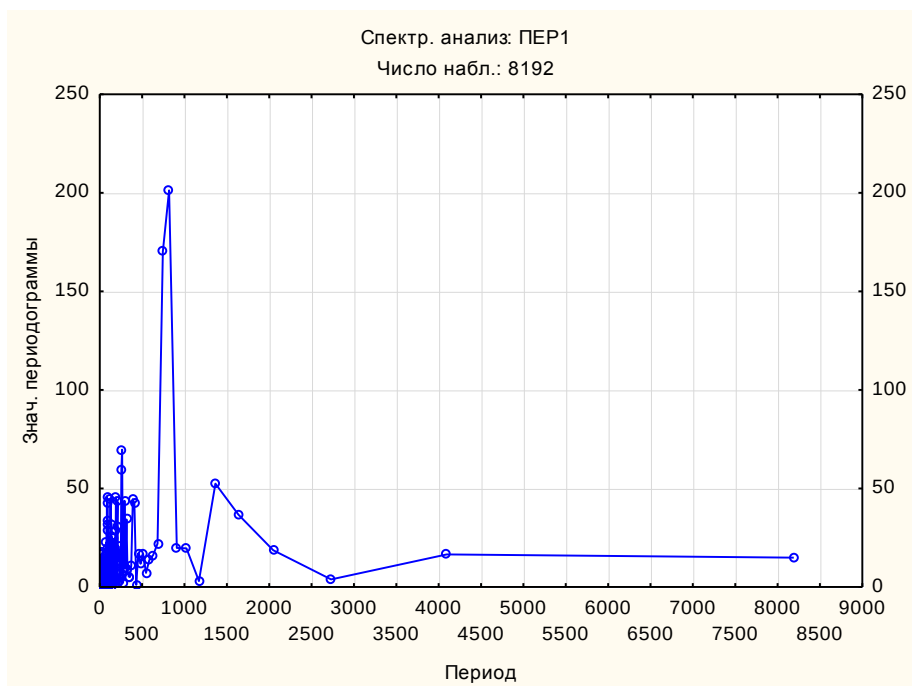


Рисунок 3.19 – Спектр ряда значений фактора №2 меридиональной скорости течения (а) и его короткопериодная часть (б)

На рисунке 3.20 представлен график значений третьего фактора после вращения. Не смотря на многочисленные мелкопериодные флуктуации, на этом графике гораздо лучше выражена полуприливная гармоника в местах

резких скачков амплитуды, чем на аналогичных графиках для первого и второго фактора(см. рис. 3.18 и 3.16).

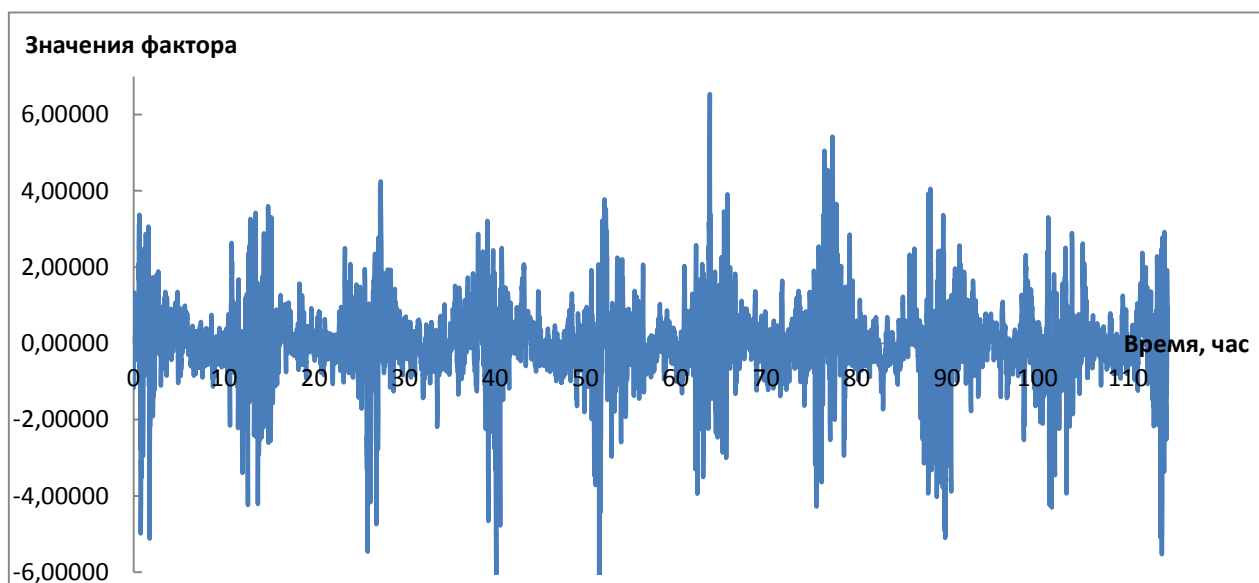


Рисунок 3.20 – График значений третьего фактора меридиональной составляющей скорости после вращения варимакс.

Не смотря на явную выраженность полуприливной гармоник на рисунке 3.20, значения спектрального анализа, выведенного в виде спектрограммы на рисунке 3.21(а), соответствующий пик имеет малую спектральную плотность. Значения периодограммы на в короткопериодной части 3.21(б) представлены гораздо большими значениями. Наиболее значимый пик имеет период 409,6 минут(6,8 часов). Это один из наиболее часто встречающихся периодов в анализе этой работы и соответствует периоду приливной волны М4. Следующие по значимости пики имеют период 167,1 минуту(2,8 часов), 372,3 минуты(6,2 часа), 85,3 минуты(1,4 часа), 112,2 минуты(1,9 часа).

Мелкопериодная часть графика(рисунок 3.21(б)) показывает, что самые высокие пики периодограммы заключены в промежутке от 1,9 часов до 6 часов и описывают мезомасштабные процессы в глубинном слое.

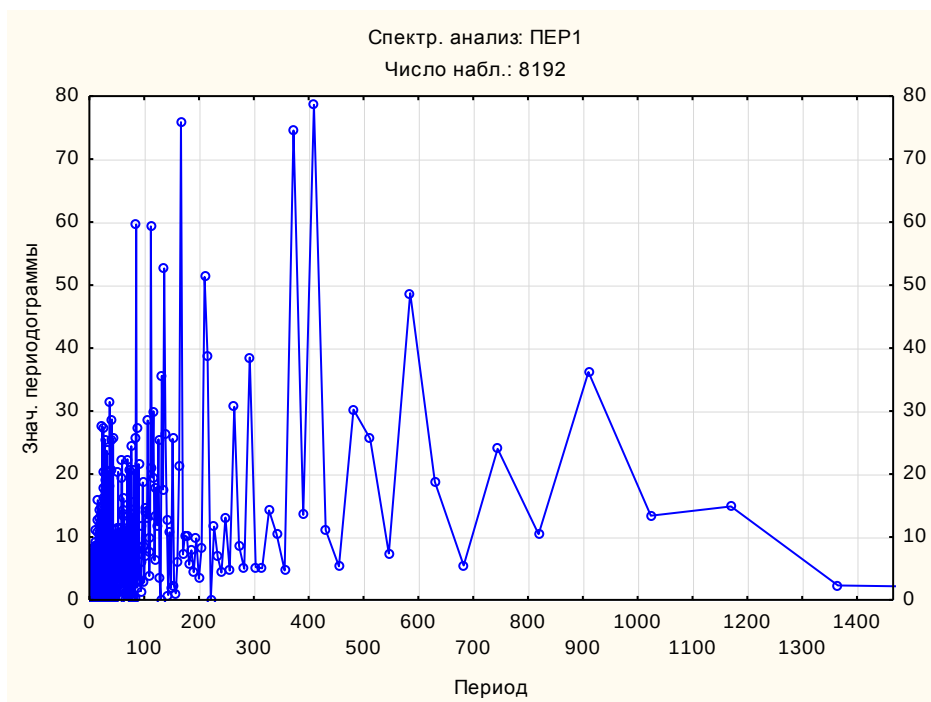
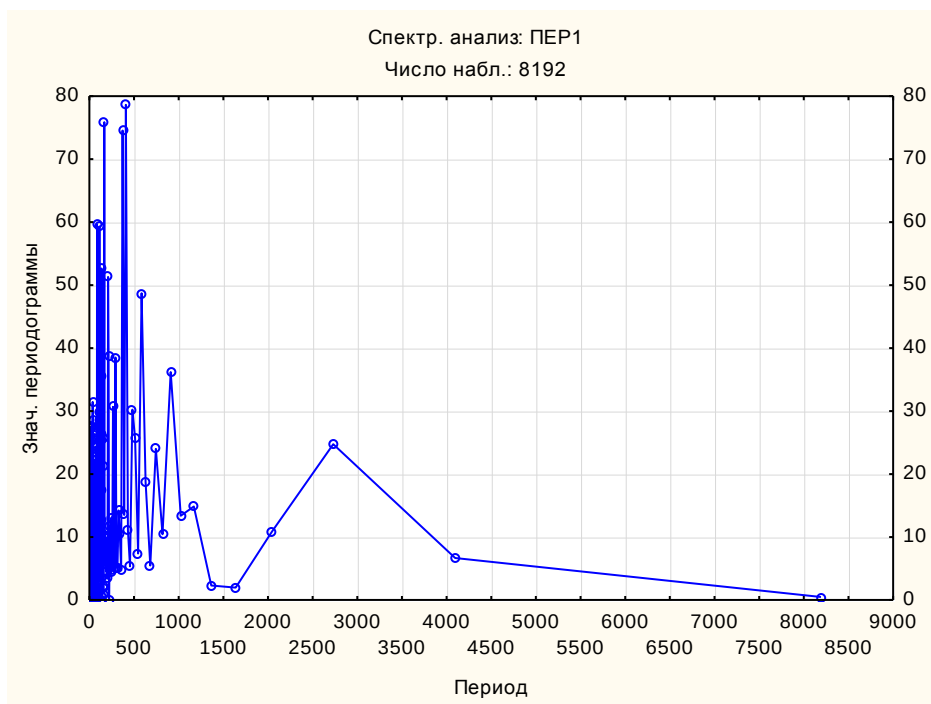


Рисунок 3.21 – Спектр ряда значений фактора №3 меридиональной скорости течения (а) и его короткопериодная часть (б)

Резюмирую результаты статистического анализа меридиональной составляющей скорости, можно выделить интервал периодов от 1,5 часа до 6 часов в котором содержалось наибольшее количество значимых

короткопериодных колебаний, природу которых не всегда легко определить с физической точки зрения.

Так же было замечено, что в среднем слое, описанным первым фактором, как с вращением, так и МГК, плохо выражена полусуточная приливная составляющая. В некоторой степени это могло быть вызвано тем, что вектор приливного течения разворачивался с глубиной и конкретно на этих горизонтах он был перпендикулярен(или близок к этому) меридиональной составляющей. Это подтверждают результаты спектрального анализа первого фактора, описывающего изменчивость на тех же горизонтах, в котором доминирующей гармоникой была полусуточная M2, а все прочие колебания были плохо выражены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении работы были использованы различные программные средства, позволившие выполнить необходимые вычисления, анализ данных и построение графиков.

В результате выполнения работы был выбран район Западной СоловецкойСалмы. С помощью программных средств обработаны полученные данные различными статистическими методами. Также проведены исследования временной изменчивости компонент скорости течений, которые позволили выделить основополагающие значимые факторы.

Основываясь на полученных результатах, можно заключить, что изменчивость в Белом море может быть разделена на три группы. В первую входят колебания с периодом 6 – 12 часов, которые соответствуют мезомасштабному интервалу изменчивости гидрофизических полей океана. Ко второй группе можно отнести изменчивость с периодом 1,5 – 6 часа, связываемая с субмезомасштабными вихрями, внутренними волнами, процессами вовлечения и передачи турбулентности верхним слоем. И к третьей группе относятся короткопериодные колебания с периодами от нескольких минут до нескольких десятков минут, относящиеся к мелкомасштабной изменчивости (тонкая структура, турбулентность, короткопериодные внутренние волны) гидрофизических полей. Чтобы четко выделить мелкомасштабные колебания была построена короткопериодная часть спектра.

Так же по итогам анализа была выявлена группа колебаний с периодом, превосходящим сутки. Но для точного анализа столь крупномасштабных колебаний, требуется более длительный временной ряд.

Результаты спектрального анализа во многом получились неоднозначными в результате того, что предметом изучения были значения факторов, латентных переменных, которые не описывают всю изменчивость

скоростей течений на всех горизонтах целиком, а хорошо характеризует лишь часть вертикального профиля. У верхнего слоя, вовлеченного в турбулентность, и у нижнего выделялись колебания с разной периодичностью, так как возбуждались разными процессами. Так же разительно отличались результаты широтной и меридиональной составляющей. В широтной составляющей практически все колебания в скорости обуславливаются приливными явлениями, выделялись волны M2 и M4. Наблюдалась ярко выраженная двуслойная структура. Первый фактор отлично характеризовал хорошую стратифицированность нижнего слоя, расположенного на глубине между 26, 2 и 58,2 метрами. Вторым фактор описывал турбулентное вовлечение приповерхностного слоя на слой, начинающийся с 18 метров. Наибольшие значения нагрузок приходилось на уровне от 20,2 до 22,2 метров.

Контрастно этому, меридиональная составляющая была наполнена множеством разнопериодных колебаний, напоминающих белый шум. Без вращения факторные нагрузки принимали слабые значения. Только у генерального фактора они достигали критических значений на слое от 34,2 до 51,2 метров. Поэтому было принято решение воспользоваться вращением Varimax для описания возможной структуры придонного и верхнего слоя. Как оказалось, только в них присутствует значимое влияние приливных течений (M2, M4, M6), которые описывали второй и третий факторы. Но наибольшее предпочтение у всех трех факторов было отдано мелкопериодным колебаниям от 1,5 до 6 часов.

Вероятнее всего такие различия возникли из-за географического положения и гидрологического режима, а точнее из-за постоянных течений в той области. В проливе Западная Салма течения направлены на юго-юго-восток. Накладываясь на меридиональную скорость, они, предположительно, могут вызывать пульсации скорости, которые в меньшей степени окажут

влияние на широтную составляющую. Так же свою роль может играть изменение направления вектора течений в экмановском слое.

Мелкомасштабные колебания в районах пролива Западная Салма вносят значительный вклад в общую изменчивость скорости течения. Турбулентные процессы на границе раздела вода-воздух и в поверхностном слое оказывают сильное влияние до самого дна, нарушая целостность стратификации. Их определение затрудняется присутствием большого количества различных периодичностей, что требует дополнительного дальнейшего изучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том II Белое море/ под.ред. Б. Х. Глуховского [Текст]. – Л.: Гидрометиздат, 1991. – 240 с.
2. Зимин А. В. Короткопериодная изменчивость гидрофизических полей и характеристик внутреннего волнения в течение суточного приливного цикла в шельфовых районах Белого моря [Текст]. – Океанология – 2013.– Т. 53, № 3.– С. 293 – 303
3. Мохнаткин Ф. Ю. Характеристики внутренних волн по данным радиолокационных изображений Белого моря за летний период 2010 г. Магистерская диссертация [Текст]. – 2012. – 70 с.
4. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов/ под.ред. Н. Н. Филатова, А. Ю. Тержевика[Текст]. – П.: РАН, 2007. – 349 с.
5. Наумов А. Д. Двустворчатые моллюски Белого моря. Опыт эколого – фаунистического анализа [Текст]. – СПб.: РАН, 2006. – С. 35
6. Артемьев Е. В. Количественные характеристики мелкомасштабной изменчивости термохалинной и динамической структуры вод Белого моря в различных по гидрологическим условиям районах. Дипломный проект[Текст]. – 2014. – 226 с.
7. Лоция Белого моря[Электронный ресурс]: Гидрометеорологический очерк. – Электрон.дан. – Режим доступа: <http://rivermaps.ru/doc/beloe/beloe-3.htm>
8. С. М. Гордеева Практикум по дисциплине статистические методы обработки гидрометеорологической информации [Текст]. – СПб.: - РГГМУ, 2010. – 74 с.
9. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях [Текст]. – Л.: Гидрометиздат, 1977. – 724 с.

10. Зимин А. В. Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натурных наблюдений [Текст]. – Океанология – 2012. – Т. 52, № 1. – С. 16 – 25
11. Наумов А. Д. Двустворчатые моллюски Белого моря. Опыт эколого – фаунистического анализа [Текст]. – СПб.: РАН, 2006. – С. 35
12. В. Н. Малинин Статистические методы анализа гидрометеорологической информации [Текст]. – СПб.: РГГМУ, 2008. – С. 300
13. Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. Отв. ред. Лисицын А. П., ред. Немировская И. А. [Текст]. – М.: Научный мир, 2012. – 780 с.
14. Зимин А.В., Родионов А.А., Здоровеннов Р.Э., Романенков Д.А., Шевчук О.И., Родионов М.А., Жегулин Г.В. Исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в Белом море в июле-августе 2012 года с научно-исследовательского судна «Эколог». Фундаментальная и прикладная гидрофизика [Текст]. – СПб.: Наука, 2012. – Т. 5. № 3. – С. 85 – 88.
15. Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е., Шапрон Б., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Мясоедов А.Г., Коллар Ф. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 года. Исследование Земли из космоса [Текст]. – 2014. – № 3. – С. 1–14.