

30. Инжебейкин Ю.И. Исследования нелинейного взаимодействия длинноволновых движений в Белом море // Тр. 11-й Международная зимней школы-семинара по механике сплошных сред. Пермь: УрО РАН, 1997.
31. Инжебейкин Ю.И. Динамика и устойчивость устьевых экосистем Баренцева региона в условиях антропогенных воздействий и климатических изменений (проблемы и задачи) // Оценка последствий Глобальных изменений для Баренцева региона: импактные исследования в Баренцевом море (BASIS): Тр. Международн. конф. С.-Петербург, 1998.
32. Inzhebejkin Ju. I, Judahin F.N. Interaction effects in water dynamics of mezo- and synoptic scales on the White see shelf // Annales Geophysicae. Part II. Society Symposia, Ocean & Atmosphere. Supplement I to Volume 16, Nice, 1998.
33. Инжебейкин Ю.И. Состояние и проблемы исследований прибрежных экосистем окраинных морей Арктики (Белого, Баренцева) // Европейский Север России: прошлое, настоящее, будущее: Тр. международн. конф. Архангельск, 1999.
34. Инжебейкин Ю.И., Трошков В.В. Мезомасштабные неоднородности в распределении гидролого-гидрохимических и гидробиологических элементов в Горле Белого моря // Геодинамика и геоэкология: Тр. международн. конференции. Архангельск, 1999.
35. Инжебейкин Ю.И. Собственные колебания уровня Белого моря // Геодинамика и геоэкология: Тр. международн. конференции. Архангельск, 1999
36. Inzhebejkin Ju. The dynamics and stability of the Barents and White Sea ecosystems under the impacts of anthropogenic loads and climate change // In book "Global changes and the Barents Sea Region". Germany, Munster, 1999.
37. Инжебейкин Ю.И., Мискевич И.В., Лупачев Ю.В. и др. Абиотические факторы динамической устойчивости устьевых и прибрежных экосистем окраинных морей Арктики (Белого, Баренцева) // Деп. во ВНИТЦ, 2000. № 02.200.1 06837, 194 с.
38. Инжебейкин Ю.И., Климов С.И. Проблемы моделирования экосистемы Белого моря // Тр. VIII Всероссийского съезда гидробиологического общества РАН. Калининград, 2001.

Б-ке

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Российский Государственный Гидрометеорологический Университет

На правах рукописи
УДК 551.466.7; 551.461

ИНЖЕБЕЙКИН Юрий Иванович

КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ БЕЛОГО МОРЯ

Специальность 25.00.28 – ОКЕАНОЛОГИЯ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Санкт-Петербург - 2004

Диссертационная работа выполнена в Институте экологических проблем Севера Уральского отделения Российской Академии Наук (г. Архангельск)

Официальные оппоненты:

- доктор географических наук Малинин В.Н.
- доктор географических наук Фукс В.Р.
- доктор географических наук Денисов В.В.



Ведущая организация – Институт водных проблем РАН.

Защита состоится «21» X 2004 г. в 15³⁰ часов на заседании специализированного Совета Д212.197.02 по присуждению ученой степени доктора наук в Российском государственном гидрометеорологическом университете им. П.П. Шерешевского в Санкт-Петербурге, Малоохтинский пр., 96

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, Санкт-Петербург

Автореферат разослан «21»

Ученый секретарь
Специализированного совета
кандидат географических наук



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Исследование колебаний уровня Белого моря, как одного из элементов динамики вод, его возможных изменений под влиянием естественных и антропогенных факторов имеет важное научное и практическое значение в связи с расширением экономического освоения природных ресурсов моря, интенсификацией морского судоходства, осуществляемого практически круглогодично, а также другими текущими и планируемыми водохозяйственными мероприятиями. Значимость исследований динамического режима обусловлена также тем, что в формировании гидрофизических, гидрохимических (включая распределение загрязняющих веществ) и гидробиологических (планктон) полей Белого моря решающий вклад вносится динамикой его вод. Таким образом, в широком смысле актуальность темы диссертации обусловлена насущной необходимостью исследования динамики вод Белого моря для изучения и решения широкого круга крайне важных проблем. В то же время, во многих случаях необходимы сведения собственно и о самих колебаниях уровня моря. Так, для практических нужд, в частности, для строительства прибрежных и морских гидротехнических сооружений имеется острая потребность в исследовании экстремальных уровней, обусловленных, главным образом, сочетанием приливных и сгонно-нагонных явлений, в оценке частоты их появления и исследовании механизма формирования. Это связано с тем, что значительные подъемы уровня приводят к затоплению прибрежных территорий, разрушению портовых сооружений и народнохозяйственных объектов. Экстремально низкие уровни могут создавать затруднения в навигации, приводить к гибели мальков в зонах нереста рыб, а при последующем вслед за сгонами нагоне – к опасному проникновению морских вод в рукава дельты Северной Двины.

Хотя исследованию колебаний уровня Белого моря в разное время уделялось определенное внимание, не все аспекты этой проблемы можно считать решенными. В мезо- и синоптическом масштабе изменчивости основные нерешенные вопросы состоят в следующем:

- совершенно не исследованы сейшевые колебания и не оценен их возможный вклад в изменчивость уровня моря;
- не изучены процессы нелинейного взаимодействия между штормовыми нагонами и приливами, влияние их на изменение режима приливов, выявление и учет которого важны не только для научных, но

и для прикладных целей, а именно, для корректировки издаваемых навигационных пособий и собственно для задач самой навигации;

- не изучено влияние строительства проектируемой ПЭС в Мезенском заливе на режим короткопериодных колебаний уровня во всем море.

В крупномасштабной изменчивости:

- не выявлено различие сезонных колебаний уровня моря в разных районах моря и соответственно роль факторов, формирующих это различие в сезонной изменчивости уровня;

- не изучены особенности длиннопериодных приливов ("полюсного", лунно-деклинационного), не оценен их вклад в изменчивость уровня;

- не оценен вклад различных составляющих в однонаправленные движения уровня в разных районах моря и т.д.

Решение этих вопросов способствует составлению цельного представления о широком спектре колебаний уровня моря и выявлению особенностей их формирования в отдельных интервалах частот.

Цель и задачи исследования. Целью работы является выявление особенностей и раскрытие закономерностей формирования уровня Белого моря по широкому диапазону его пространственно-временной изменчивости с использованием современных теоретических и вероятностно-статистических методов. Для достижения этой цели требовалось решить следующие задачи:

- проанализировать и обобщить имеющиеся сведения о колебаниях уровня моря, оценить, насколько степень их полноты и уровень достоверности достаточны для отражения пространственно-временной изменчивости уровня;

- исследовать связь колебаний уровня синоптического интервала частот с вынуждающими силами, разработать численную модель и выявить основные закономерности формирования суммарных уровней при различных типах циклонов и антициклонов, перемещающихся над Белым и Баренцевым морями;

- изучить взаимодействие приливов и нагонов, разработать соответствующую численную модель и оценить влияние указанного взаимодействия на изменение режима приливов в море, а также на формирование экстремальных уровней;

- оценить частотные характеристики и величины собственных колебаний уровня Белого моря;

- выявить особенности крупномасштабных колебаний уровня в различных районах моря, выполнить районирование моря по типу сезонного хода и вкладу различных факторов;

- изучить экстремальные уровни редкой повторяемости, оценить их величины, выполнить районирование моря по величине и характеру экстремальных отклонений уровня моря, с оценкой вклада различных составляющих в формирование экстремальных уровней в выделенных районах;

- исследовать влияние крупных гидротехнических сооружений (строительства проектируемой ПЭС в Мезенском заливе) на изменение режима короткопериодных колебаний уровня.

Использованная информация и методика исследований. При выполнении работы использовались литературные, справочные сведения о колебаниях уровня и фондовые ведомственные данные по океанологическим и некоторым метеорологическим элементам. В качестве исходного материала послужили данные об уровне моря и стоке основных крупных рек за весь период наблюдений до начала 1990-х годов. Кроме того, были использованы данные наблюдений над уровнем с помощью мареографов открытого моря, восьмисрочные значения атмосферного давления и ветра на 33-х прибрежных и островных станциях Северного и Мурманского УГМС за несколько выбранных лет, синоптические кольцевые карты погоды за штормовые периоды и сборно-кинематические карты.

Для решения поставленных задач использовались методы: полосовой и низкочастотной фильтрации, классической и робастной математической статистики, гармонического и корреляционно-спектрального анализа случайных процессов, численного гидродинамического моделирования, базирующегося на теории мелкой воды, а также теория линейных динамических систем с постоянными параметрами и асимптотическая теория экстремальных значений.

Основные защищаемые положения:

1. Уточнение типизации циклонов применительно к изучению штормовых нагонов и закономерности формирования суммарных уровней во время штормов при различных типах циклонов.

2. Идентификация в Белом море явления нелинейного взаимодействия между приливами и волнами штормового нагона и описание с помощью разработанной численной модели (на основе так называемого метода "параллельных моделей") механизма этого взаимодействия; установленные изменения приливного режима моря под влиянием нелинейного взаимодействия.

3. Частотные характеристики и котидальные карты резонансных осцилляций, соответствующих первым пяти модам сейшевых колебаний уровня Белого моря.

4. Выявленные закономерности и рассчитанные характеристики крупномасштабной изменчивости уровня; географическое районирование моря по виду сезонного хода уровня и вкладу в него различных факторов.

5. Устойчивые статистические характеристики и функции распределения экстремальных уровней, оценка величин экстремальных уровней редкой повторяемости, географическое районирование моря по данному параметру.

6. Оценка влияния строительства проектируемой ПЭС в Мезенском заливе на режим короткопериодных колебаний уровня в Белом море.

Научная новизна: Выполнено обобщение исследований по широкому диапазону изменчивости уровня Белого моря. С учетом нелинейности движений приливного и синоптического масштабов, включая нелинейное взаимодействие между ними, выявлены и изложены особенности формирования суммарных уровней в условиях штормов при различных (по траекториям их движения) типах циклонов, перемещающихся над Белым и Баренцевым морями.

Детально изучен механизм нелинейного взаимодействия между сгонно-нагонными колебаниями и приливами, выявлено и оценено влияние указанного взаимодействия, на режим приливов в Белом море. Дана характеристика и впервые оценены параметры резонансных осцилляций, соответствующих первым пяти модам сейшевых колебаний.

Установлены закономерности и оценены величины крупномасштабных колебаний уровня (включая длиннопериодные приливы), выполнено районирование моря по типу сезонного хода и вкладу в него различных факторов.

Построены функции распределения максимальных и минимальных уровней, показано, что региональные функции распределения их, в основном, аппроксимируются первым предельным распределением. Рассчитаны максимальные и минимальные уровни редкой повторяемости, выполнено районирование моря по их величинам. Оценены составляющие, которые формируют экстремальные уровни; показано, что в формировании последних вклад сгонно-нагонных колебаний для большинства случаев сравним с приливыми.

Оценено влияние крупных гидротехнических сооружений (строительства проектируемой ПЭС в Мезенском заливе) на режим короткопериодных колебаний.

Обоснованность научных положений и выводов. Степень обоснованности выводов определяется большим объемом, полнотой и всесторонним контролем использованных данных; применением современных методов вероятностного анализа и численного гидродинамического

моделирования; согласованностью результатов расчетов с наблюдениями. Кроме того, в диссертации соблюдался принцип соответствия, согласно которому новые подходы, имеющие обобщающий характер, в области применимости старых должны приводить к близким результатам.

Практическая значимость. Полученные в работе характеристики уровня режима Белого моря включены в “Справочник по гидрометеорологическим условиям шельфовой зоны Белого моря”; в серию монографий “Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР”, т. II – “Белое море”; использованы институтом “Атомтеплоэлектропроект” при проектировании Северодвинской ТЭЦ-1. Результаты работы также могут использоваться 1) в подготовке томов ОВОС при планировании и проведении различных крупных мероприятий в процессе освоения минеральных и сырьевых ресурсов моря; 2) при долгосрочном планировании социально-экономического развития прибрежных городов, крупных населенных пунктов и территорий; 3) при исследовании и прогнозировании природных и антропогенных катастроф в регионе; 4) в учебном процессе в качестве спецкурса, предназначенного для магистров по специальности “океанология”; 5) значения экстремальных уровней моря редкой повторяемости – при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений и обеспечения безопасности мореплавания.

Вклад автора. Диссертант участвовал в оптимизации сети стационарных наблюдений над уровнем Белого моря, в разработке программ экспедиционных исследований, непосредственно участвовал в проведении экспедиционных работ возглавляемых им Северо-Двинской устьевой станции в Северном УГМС и лаборатории водных экосистем в Институте экологических проблем Севера УрО РАН. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключалось также в разработке численной гидродинамической модели суммарных уровней Белого моря и установлении механизмов формирования суммарных уровней при различных типах циклонов; в оценке величин разномасштабных колебаний уровня и выделении основных факторов, их обуславливающих; разработке гидродинамической модели на основе метода “параллельных моделей” и оценке влияния нелинейного взаимодействия между приливом и нагоном на формирование последних; оценке влияния крупных гидротехнических сооружений типа ПЭС на короткопериодные колебания уровня Белого моря.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы были представлены на всесоюзном координационном совещании-семинаре по исследованию гидрометеорологического и гидрохимического режима

морей СССР (Махачкала, 1985), II региональной конференции "Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря" (Архангельск, 1985), III съезде советских океанологов (Ленинград, 1987), II Международной школе-семинаре "Экологические проблемы Европейского Севера" (Архангельск, 1992), 11-й (II Пермь, 1997), III Международной конференции по механике сплошных сред регионе: экология, экономика, социальные проблемы, культура" (Архангельск, 1997), Международной конференции "Оценка последствий глобальных изменений для Баренцева региона: импактные исследования в Баренцевом море (BASIS)" (С.-Петербург, 1998), научном симпозиуме "Alpes Geophysicae. Part II. Society Sumprosa, Ocean & Atmosphere" (Ницца (Франция), 1998), Международной конференции "Теодинамика и геоэкология" (Архангельск, 1999), Международной конференции "Поморье в Баренцевом регионе на рубеже веков: экология, экономика, и прикладной механике (Пермь, 2001), VIII Всероссийском съезде гидробиологического общества РАН (Калининград, 2001), Международной конференции "Экология Северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения" (Архангельск, 2002), Международном научном семинаре "Современные информационные технологии в океанологии и биологии" (Ростов на Дону, 2003), а также на научных семинарах отдела динамики моря Государственного океанографического института (Москва, 1985-1988), отдела термодинамического моделирования Ленинградского отделения ГИОНА (Ленинград, 1986) и кафедры океанологии РГГМУ (С.-Петербург, 2003). По теме диссертации опубликовано 37 работ, в т.ч. 3 монографии. Из них 1 монография и 22 работы написаны без соавторов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав и заключения. Текст диссертации включает 267 стр., из которых 48 стр. отвечены под иллюстрации; список литературы содержит 149 наименований.

Выгодность. Работа была начата в отделе режима моря в Северном УГМС под руководством доктора технических наук В.Х.Г.Германа (ГОИН), продолжена и завершена в Институте экологических проблем Севера, возглавляемом членом-корреспондентом РАН Ф.Н.Юдахиным. Творческая и благодетельная атмосфера в этих коллективах способствовали выполнению работы по обобщению большого количества фактического материала, за которую автор благодарен коллегам: к.г.н. А.Г.Кравцу,

к.г.н. В.Н.Полупанову, С.И.Климову, Т.А.Щепоткиной, К.А.Старкову, С.В.Снеговскому и др. Автор выражает благодарность научному консультанту доктору географических наук, профессору А.В.Некрасову за подробные обсуждения работы и помощь в области модельных исследований влияния гидротехнических сооружений на приливные движения; доктору географических наук, профессору В.Н.Малинину за ценные советы при исследовании межгодовых вариаций уровня.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, освещены научная и практическая значимость работы, а также кратко изложено содержание работы.

В первой главе дается краткая физико-географическая характеристика моря и характеристика материалов наблюдений над уровнем Белого моря. Отмечено, что изменчивость уровней в морях и, в частности в Белом море, формируется процессами чрезвычайно широкого спектра. В работе (Монин, Каменкович, Корт, 1974) в изменчивости мирового океана выделены семь интервалов. Объединив три последние из них (в порядке возрастания периодов) в крупномасштабный интервал, нами в динамике вод Белого моря выделено четыре масштаба:

- 1) мелкомасштабные движения с пространственными и временными масштабами соответственно от долей миллиметра до десятков и сотен метров и от долей секунды до нескольких минут, которые формируются главным образом ветровыми волнами;
 - 2) мезомасштабные движения – от сотен метров до размеров моря и от часов до суток. В полосу частот этих движений попадают приливные, сейшевые и инерционные движения;
 - 3) синоптические процессы – от десятков километров до размеров моря и от часов до десятков суток;
 - 4) крупномасштабные движения, охватывающие по пространству все море и имеющие периоды от нескольких месяцев до сотен лет. В этом масштабе для Белого моря с учетом масштабов наблюдений, существенными могут оказаться сезонные, межгодовые и внутривековые колебания.
- В дальнейшем нами будут рассматриваться последние три масштаба изменчивости.

Значителен размах колебаний уровня (разность между абсолютным максимумом и абсолютным минимумом за весь период наблюдений) (Таблица 1). Так, максимальные величины колебаний уровня за многолетний

период составляют от 266 см в Пертоминске до 544 см в Архангельске и Сосновце, а в вершине Мезенского залива достигают 10 м.

Таблица 1
Максимальные величины колебаний уровня моря
по данным за многолетний период

Станции	За период наблюдений	Величина колебаний уровня моря, см
Кандалакша	1948 – 1985	410
Умба	1939 – 1985	320
Кашкаранцы	1954 – 1966; 1981 – 1985	374
Чаваньга	1952 – 1985	282
Пялица	1956 – 1965	284
Сосновец	1936 – 1985	545
Мудьюг	1945 – 1985	347
Северодвинск	1939 – 1962; 1969 – 1985	355
Пертоминск	1959 – 1985	266
Жижгин	1949 – 1985	289
Онега	1946 – 1985	536
Разнаволок	1921 – 1941; 1947 – 1985	334
Кемь-Порт	1921 – 1985	325
Соловки	1953 – 1985	269
Гридино	1961 – 1970	304
Ковда	1950 – 1985	350
Архангельск	1905 – 1985	544
Семжа	1967 – 1971	1003

Хотя первые наблюдения над уровнем Белого моря были начаты в дельте реки Северная Двина еще в 1881 г., но вплоть до 1936 г. эти наблюдения проводились изыскательскими партиями, носили эпизодический характер и выполнялись, главным образом, для привязки прибрежных промеров глубин. Самые ранние систематические наблюдения были выполнены в пунктах Кемь-Порт, Разнаволок (1917) и Соловки (1923). В 30–40-х годах число уровенных постов с непрерывными наблюдениями увеличилось до 19. Сложившаяся к началу 90-х годов сеть уровенных наблюдений Белого моря насчитывала 24 береговых и островных уровенных поста моря и 7 уровенных постов в устьевой области Северной Двины. Измерение уровня осуществляется тремя способами: по футштоку, по самописцу уровня моря СУМ и по прибрежному мареографу ГМ–28. Отсчеты снимались с точностью 1–2 см для первого, 2–3 см для второго и третьего способов (Руководство..., 1973). Отмечено, что, несмотря на

различные методы измерения, данные об уровне можно считать однородными и равноточными. Продолжительность рядов к началу 90-х годов прошлого века составляла 20–40 лет. Расположены уровенные посты вдоль побережья моря, примерно через 70–100 км, большинство на оконечностях мысов, островах, открытых участках береговой линии и репрезентативно для изучения изменчивости уровней в море.

Системой отсчета уровней является Главная высотная основа (ГВО) в “Балтийской системе высот”, отнесенная к эпохе 1977 г. и введенная с 1 января 1979 г. Нулем каждого уровенного поста служит единый нуль поста моря с отметкой – 5,000 м относительно нуля Кронштадского футштока. Знание точного превышения нуля поста над его реперами, в особенности над исходным репером, и точной отметки последнего в системе государственной нивелирной сети обеспечивается не по всем постам. Таким образом, имеющиеся материалы наблюдений позволяют судить лишь об ограниченном диапазоне изменчивости уровня.

Вторая глава посвящена исследованию колебаний уровня в мезомасштабном диапазоне их изменчивости, в который по возрастанию периодов от часов до десятков часов попадают приливные и сейшевые вариации уровня моря. Характеристика приливного режима дана по литературным источникам (Стахевич, 1927; Тирон, 1939; Кравец, 1982; Гидрометеорология и гидрохимия..., 1991). Отмечено, что приливы в Белом море индуцируются баренцевоморскими приливами и собственный прилив весьма мал. Приливы отличаются значительной сложностью и разнообразием и вносят преобладающий вклад в формирование суммарных уровней.

Для бассейнов произвольной сложной формы на вращающейся Земле основные методы расчета сейшевых колебаний были разработаны Платцманом (Platzman, 1972), Швабом и Рао (Shwab, Rao, 1976). Метод Платцмана основан на “резонансной итерации”, а в методе Шваба и Рао численно подбираются и решаются два набора ортогональных функций. Эти методы сравнительно трудоемки. Имеется работа Вюббера и Краусса (Wubber, Krauss, 1979), в которой собственные колебания в бассейне рассчитаны на основе численного решения уравнений мелкой воды с последующим спектральным анализом результатов счета. Гринберг (Greenberg, 1979) для вычисления собственного периода системы Фанди-Мэн использовал другой метод. Он исходил из того, что энергия волны, переносимая через открытую границу полузамкнутого бассейна, будет максимальной, когда периоды волны и собственных колебаний совпадут. Выполненные расчеты дали результаты, которые хорошо интерпретируются с физической точки зрения.

Сейши в Белом море могут быть вызваны резкими изменениями полей ветра или атмосферного давления собственно над Белым морем при быстро перемещающихся циклонах и антициклонах, а также входящими из Баренцева в Белое море волнами штормового нагона. Для оценки реакции вод Белого моря на вынуждающие силы определенной частоты мы выполнили, используя описанную в главе 4 модель, серию расчетов, задавая на открытой границе (по разрезу Канин Нос – Св. Нос) нагоны в виде волн Кельвина:

$$\zeta_n(t) = \zeta_{CH}(t) \exp\left(-\frac{fy}{\sqrt{gH}}\right) \quad (1)$$

с периодом волн от 3-х до 48 часов с шагом 0,1 часа. В уравнении (1)

$\zeta_{CH}(t) = \frac{B}{2} \cos(\omega t)$ – нагонная составляющая уровней в п. Святой Нос, величина которой нами принята при расчетах равной 1 м, т.е. $B = 1$ м (обычная величина входящих из Баренцева моря нагонных волн); y – расстояние по оси OY от п. Святой Нос до той или иной точки на открытой границе. Для оценки реакции вод моря на вынуждающие колебания и выделения резонансных частот рассчитывалась и сравнивалась осредненная по времени суммарная энергия осцилляций. Очевидно, что она будет максимальной при совпадении периодов собственных и вынуждающих колебаний. При этом кинетическая составляющая суммарной энергии рассчитывалась на основании зависимости

$$E = \frac{\rho}{2T} \iint_{\tau, S} (h + \zeta)(u^2 + v^2) ds dt, \quad (2)$$

а потенциальная – по выражению

$$\Pi = \frac{\rho g}{2T} \iint_{\tau, S} \zeta^2 ds dt, \quad (3)$$

где ρ – плотность морской воды, T – период, S – площадь.

Расчеты показали, что период осцилляций для первой моды составляет 35,7 ч. (рис. 1а). Периоды колебаний, соответствующих 2-х, 3-х, 4-х и 5-и узловой сейше, составляют соответственно 18,5; 12,5; 7,5 и 6 часов. Все амфидромические системы имеют циклонический характер. Наблюдаемый на рис. 1а пик суммарной энергии на частоте, соответствующей периоду 24,5 ч, образован одноузловой сейшей системы Кандалакшский залив – Горло – Мезенский залив.

Амфидромическая точка первой моды колебаний на резонансной частоте, соответствующей одноузловой сейше, расположена на северо-восточной части Горла (рис. 1б). Наибольшие величины колебаний уровня (до 1,25 м) одноузловая сейша может формировать в вершине Онежского

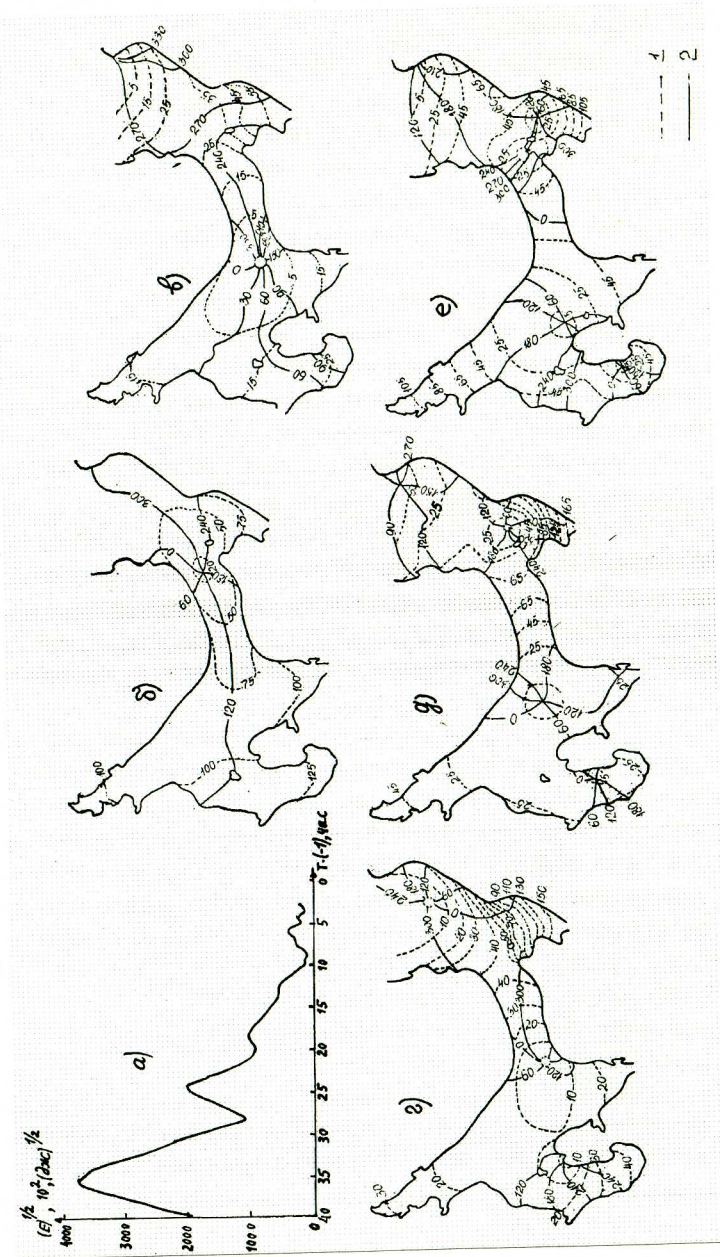


Рисунок 1 – Изменение суммарной энергии в зависимости от частоты (периода) вынуждающего воздействия (а) и распределения изоамплитуд (1, см) и изофаз (2, град) осцилляций на резонансных частотах, соответствующих одно- (б), 2- (в), 3- (г), 4- (д) и 5-узловой (е) сейше.

залива, до 1 м в вершинах Кандалакшского и Двинского заливов и до 0,75 м – в вершине Мезенского залива.

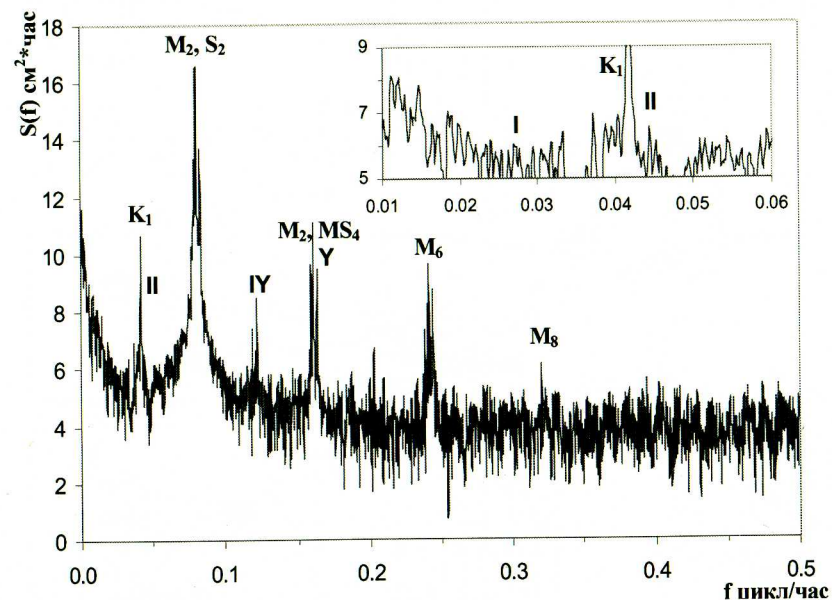
При второй моде резонансных колебаний, соответствующих двухузловой сейше, одна амфидромическая точка расположена в восточной части Бассейна вблизи границы между Горлом и Бассейном (рис. 1в). Вторая амфидромия, представляющая собой вырожденную амфидромическую систему, расположена на северо-восточной части Воронки. Наибольшие величины колебаний при двухузловой сейше образуются в Мезенском заливе и могут достигать до 0,55 м, в Воронке и Онежском заливе – до 0,25, а в Кандалакшском и Двинском – до 0,15 м.

Амфидромические системы колебаний на резонансной частоте, соответствующей трехузловой сейше, расположены: в восточной части Воронки, на крайней юго-западной части Горла, а также вырожденная амфидромическая система – на северо-восточной части Онежского залива (рис. 1г). Максимальных величин сейшевые вариации при этой моде могут достигать в Мезенском заливе (до 1,5 м) далее в Воронке, Горле и Онежском заливе (до 0,4 м), а в Кандалакшском и Двинском заливах соответственно до 0,3 и 0,4 м.

Четвертая мода осцилляций на “сейшевой” частоте с периодом 7,5 ч образует четыре амфидромические системы с центрами: на северо-восточной части Воронки; на границе между Воронкой и Мезенским заливом; в центральной части Бассейна; а также в центральной (относительно тальвега) части Онежского залива (рис. 1д). На небольшой акватории – вершине Мезенского залива – четвертая мода может вызвать колебания более 1,6 м, что является абсолютным максимумом из всех величин, полученных для осцилляций от первой до пятой моды во всех районах Белого моря. В то же время величины вариаций уровня при четвертой моде в остальных районах моря относительно невелики и могут достигать в Горле 0,6 м, в вершине Кандалакшского залива 0,4, в Воронке и вершинах Двинского и Онежского заливов 0,25, а в Бассейне 0,1 м (рис. 1д).

На резонансной частоте, соответствующей пяти-узловой сейше, амфидромии расположены: перед входом в Горло на линии м. Данилов – о. Моржовец; в северной части Мезенского залива; в южной части Бассейна, южной части Онежского залива, а также вырожденная амфидромическая система – на северо-восточной части Воронки (рис. 1е). Величины колебаний уровня при пяти-узловой сейше могут достигать в Кандалакшском и Мезенском заливах до 1 м, в Бассейне 0,25, а в остальных районах до 0,45 м.

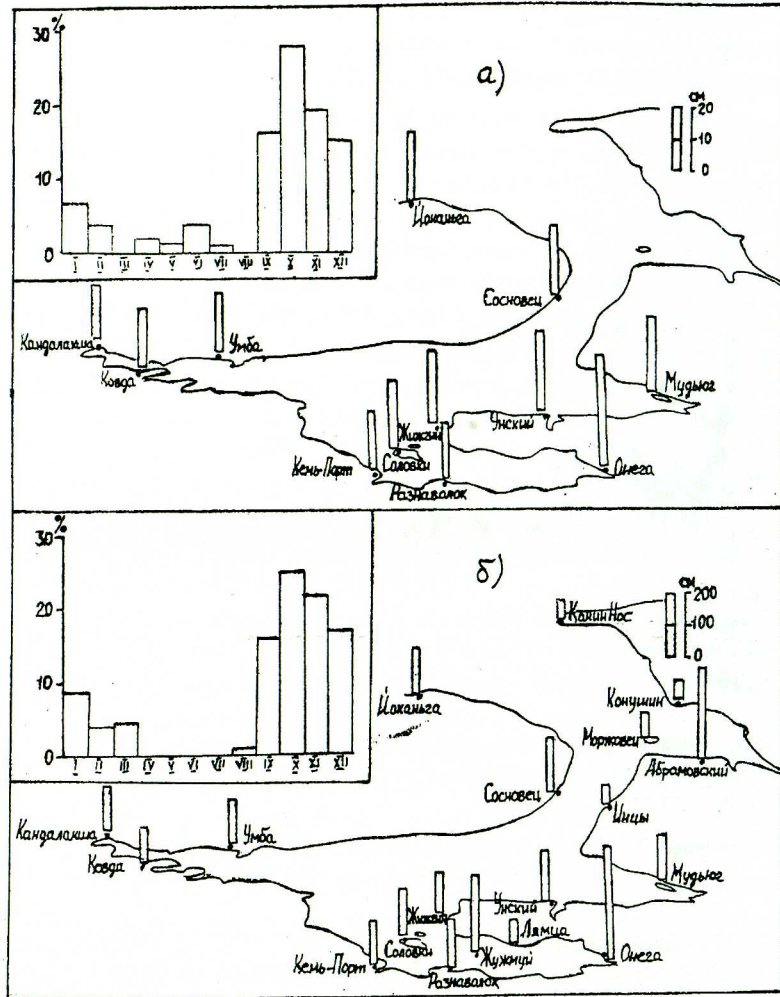
На приведенном спектре колебаний уровня по гидрометстанции Сосновец за период с мая по ноябрь 1977 г. (рис. 2), можно заметить пики на полученных резонансных частотах.



Римскими цифрами обозначены пики, соответствующие модам сейшевых осцилляций, буквами с индексами – волнам прилива. На врезке низкочастотная часть спектра колебаний уровня.

Рисунок 2 – Спектр колебаний уровня Белого моря по наблюдениям в п. Сосновец за период с мая по ноябрь 1977 г.

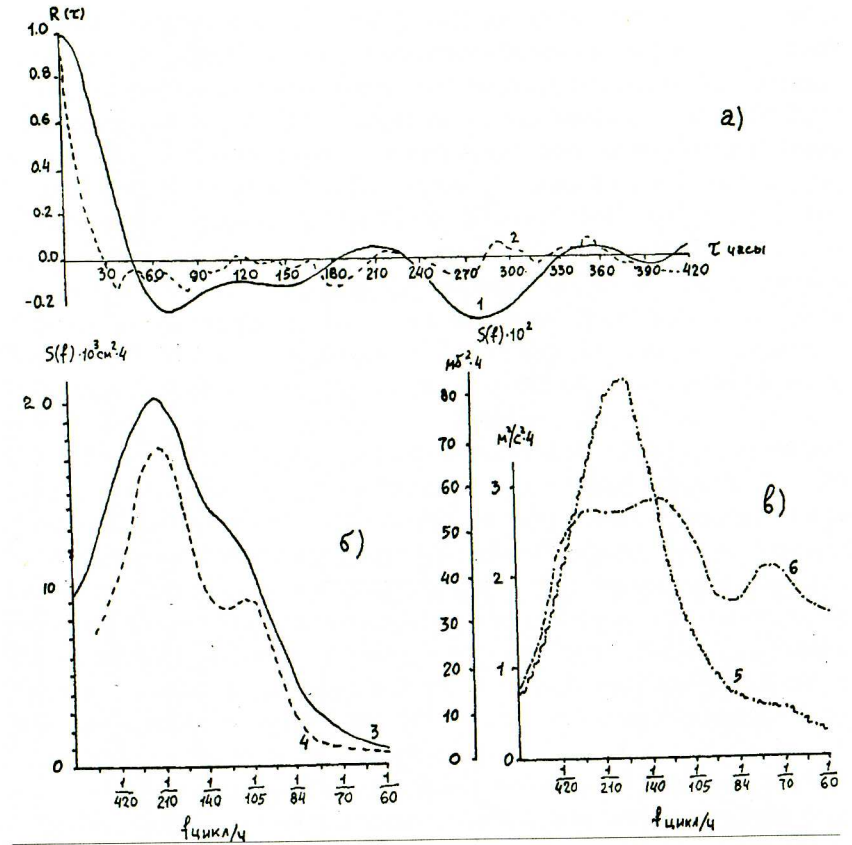
В третьей главе выполнен корреляционно-спектральный анализ непериодических колебаний уровня и определена их связь с ветром и атмосферным давлением в синоптическом диапазоне частот. Получены режимно-статистические характеристики сгонно-нагонных колебаний (рядов ежечасных значений непериодических составляющих уровней, полученных предварительным исключением из наблюдаемых суммарных уровней приливных составляющих с использованием фильтров Баттерворта за отдельные, в основном годовые периоды). Размах непериодических колебаний за выбранный период наибольший в вершине Онежского и Мезенского заливов (более 3,5 и 2,8 м соответственно 3,55; рис. 3а), и наименьший – в Бассейне и Кандалакшском заливе (около 1,3 м).



На врезках – распределение нагонных ситуаций по месяцам за период 1951–1981 гг. для Двинского залива (б) и остальных районов моря (а)

Рисунок 3 – Размах (б) и среднеквадратичные отклонения (а) неперiodических колебаний уровня за определенный промежуток времени.

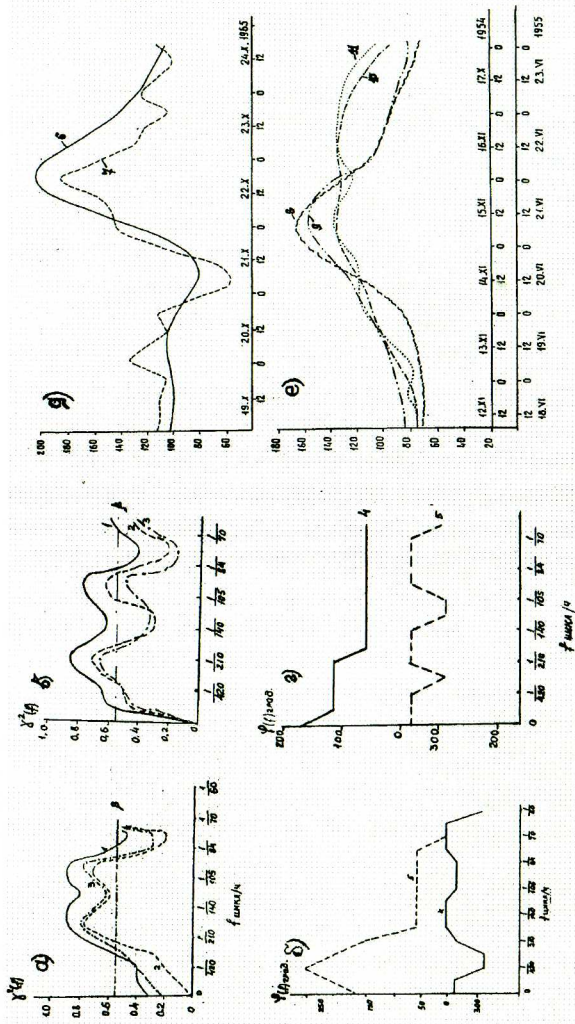
Среднеквадратичное отклонение этих колебаний от среднего уровня моря (если рассматривать только ряды годовой продолжительности) максимально в Онежском заливе, а минимально в Кандалакшском заливе (рис. 3б). За многолетний период (30 лет) выполнен анализ случаев



1, 2 – автокорреляционные функции неперiodических колебаний уровня (1) и проекции ветра на эффективное направление (2); 3 – “наблюденный” спектр уровня (верхняя и нижняя границы равны 1, $4 \cdot S(f)$ и $0,72 \cdot S(f)$); 4 – “восстановленный” спектр уровня; 5, 6 – спектры атмосферного давления и проекции ветра на эффективное направление.

Рисунок 4 – Автокорреляционные функции (а) и спектры (б, в) уровня, ветра и атмосферного давления в п. Кемь-Порт.

возникновения штормовых нагонов в Белом море и выявлено, что наибольшая повторяемость их наблюдается в сентябре – декабре, когда существенно усиливается циклоническая деятельность над Белым и Баренцевым морями (врезки на рис. 3). Отмечено, что в зимнее время формированию значительных повышений уровня препятствует ледовый покров, а в летний период циклоническая деятельность незначительна.



1 – множественная когерентность; 2 – частная когерентность системы атмосферное давление – уровень моря; 3 – частная когерентность системы эффективная составляющая ветра – уровень моря; 4, 5 – оценки сдвига фаз систем атмосферное давление – уровень и эффективная составляющая ветра – уровень; δ , ϵ – наблюдаемые (6, 8, 10) и рассчитанные (7, 9, 11) непериодические колебания уровня в п. Мудьюг при нагонах 19-24.10.1965 г. (6, 7); 20-22.06.1956 г. (8, 9) и 12-17.11.1954 г. (10, 11)

Рисунок 5 – Связь колебаний уровня моря с вынуждающими силами по наблюдениям в пунктах Кемь-Порт (а, б) и Мудьюг (в, г).

Используя метод спектральной регрессии получены количественные зависимости между уровнем и вынуждающими силами для отдельных пунктов Белого моря. Метод более привлекателен по сравнению с методом множественной линейной регрессии, поскольку позволяет учесть сложную внутреннюю структуру процесса и определить связь между исследуемыми рядами в искомом диапазоне частот, где эта связь максимальна (Герман, Савельев, 1986; Герман, 1976; Hamon, Hannan, 1963 и др.). В вариациях уровня моря и метеорологических элементов выявлена периодичность от 4-х до 9-ти суток, обусловленная прохождением циклонов и антициклонов (Рис. 4). По полученным функциям множественной и частной когерентности выявлено, что в диапазоне частот $f=1/105 - 1/210$ для всех рассмотренных пунктов отмечается тесная связь между метеозементами (атмосферным давлением и ветром) и уровнем. Например, для п. Кемь-Порт при $f=1/105$ цикл/ч значение функции множественной когерентности составляет 0,83, а функции частной когерентности соответственно равны 0,77 и 0,70 (рис. 5а). Анализ сдвигов фаз почти для всех пунктов показал, что в низкочастотной области (9–30 сут.) колебания уровня и атмосферного давления находятся в противофазе ($120-170^\circ$), что свидетельствует о доминирующей роли эффекта обратного барометра на этих частотах. На более высоких частотах (период 3–6 суток) сдвиг фаз в колебаниях уровня и давления незначителен (от 0° в п. Кемь-Порт до $57-60^\circ$ в п.п. Архангельск и Онега) (рис. 5б; 5в), что указывает на возрастание динамических факторов на этих частотах.

При оценке метеофакторов в процессе колебаний уровня установлено преобладание влияния ветра в южных районах моря и относительный рост вклада атмосферного давления в Бассейне и Горле моря, что обусловлено различием морфометрических условий в этих районах и положением последних относительно центра перемещающихся преимущественно с запада на восток циклонов. В то же время показано, что в одном и том же районе роль ветра и атмосферного давления может существенно меняться в зависимости от синоптической обстановки. Причины подобной неоднозначности роли вынуждающих сил и механизм формирования штормовых нагонов при различных синоптических ситуациях оказались трудно объяснимыми в рамках физико-статистических методов, что потребовало применения методов численного гидродинамического моделирования.

Четвертая глава посвящена гидродинамическому исследованию вариаций суммарных и непериодических уровней, сформулированы цели и задачи данного “гидродинамического” этапа исследований.

Обоснована необходимость совместного изучения и расчета приливных и стонно-нагонных движений, сочетание которых формирует экстремальные уровни моря.

Исходя из анализа размерностей, в основу разработанной в данной главе модели, основанной на адаптации модели приливов (Кравец, 1982) к физико-географическим условиям Белого моря, положена следующая система уравнений движения и неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = fv - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{c \rho_a w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{\rho(H + \zeta)} - \frac{ru}{H + \zeta} \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -fu - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{c \rho_a w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{\rho(H + \zeta)} - \frac{rv}{H + \zeta} \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(H + \zeta)u + \frac{\partial}{\partial y}(H + \zeta)v = 0. \quad (6)$$

Обозначения в уравнениях (3)–(6) общеприняты. В принятой постановке задачи нелинейные члены учитываются изменением глубины при колебаниях уровня и квадратичным придонным трением. Белое море аппроксимировалось сеточной областью, имеющей 38 узлов по оси X и 49 узлов по оси Y и с шагом 6 миль по обеим осям. В целях минимизации несоответствия сеточной области очертанию берегов, был сделан поворот сетки на угол 67° по часовой стрелке относительно осей географических координат. Для численного решения системы исходных уравнений мелкой воды выбрана явная конечно-разностная схема, построенная на разнесенной сетке (Мезингер, Аракава, 1979). В океанологии подобная схема с разностями “вперед–назад” применялась Фишером и Силеки (Фишер, 1959; Силеки, 1968), а для моделирования штормовых нагонов Флэзером и Хипсом (Флэзер, Хипс, 1975; Хипс, 1972; Генри, Хипс, 1976). Шаг по времени в соответствии с критерием устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви при шаге по пространству в 6 миль равнялся 2 минутам.

Приземное атмосферное давление в узлах сетки восстанавливалось по данным 33 береговых станций, вводимым с дискретностью 3 часа, весовой аппроксимацией с весами, обратно пропорциональными расстояниям от соответствующего узла до шести ближайших станций (Дэвис, 1977). Ветер рассчитывался по этим данным с использованием геострофических соотношений и эмпирических уравнений связи между геострофическим и приводным ветром (Хассе, Вагнер, 1971).

Возвышение уровня и составляющие осредненных по вертикали скоростей течений в начальный момент полагались нулевыми. На твердых границах принято условие непротекания, на жидких – условия

предвычисления прилива по гармоническим постоянным; учета «внешнего» нагона (сформировавшегося в Баренцевом море) в виде волны Кельвина по уровенным наблюдениям в п. Йоканьга.

Надежность работы численной модели оценивалась сравнением результатов расчетов с наблюдаемыми значениями уровней в береговых и островных пунктах. Модель позволяет воспроизводить весь процесс формирования суммарных уровней при штормовых нагонах, обеспечивая вполне удовлетворительную точность по принятым критериям (Наставления по службе прогнозов..., 1975) как во временном ходе суммарного уровня в том или ином пункте, так и в его пространственном распределении в какой-то момент времени (таблица 2, рис. 6).

Таблица 2

Критерии точности расчета ежечасных значений суммарного уровня моря

Уровни, вычисленные по численной модели, определены над невозмущенным состоянием уровня, по наблюдениям – над среднемесячными уровнями

Пункты сравнения	N	$\bar{\Delta}$	$ \bar{\Delta} $	S	r	ϵ
Сосновец	341	-6,2	29,2	38,0	0,94	0,34
Мудьюг	336	1,8	22,2	25,7	0,76	0,65
Кемь-Порт	352	6,2	20,0	25,5	0,90	0,50
Разнаволоок	185	7,1	19,2	25,6	0,90	0,52
Онега	336	1,2	34,4	44,0	0,86	0,52
По всем станциям	1550	2,2	26,2	35,3	0,87	0,50

Средние ошибки расчета максимального суммарного уровня и времени его формирования 8,2 см и 2,2 часа, параметр качества расчета не превышал 0,67 для всех рассмотренных ситуаций.

С помощью численных экспериментов и анализа данных наблюдений рассмотрен механизм и проведена оценка различных факторов в формировании суммарных уровней при конкретных штормовых ситуациях. Исходя из особенностей механизма формирования штормовых нагонов, уточнена типизация циклонов, вызывающих их, по траекториям своего движения.

Показано, что при циклонах “ныряющих” и западных, проходящих с центром над Баренцевым морем, штормовые нагоны носят характер длинной волны с вынужденной и свободной составляющими и имеют одинаковый механизм своего формирования, общая схема которого выглядит следующим образом: а) они генерируют в Баренцевом море

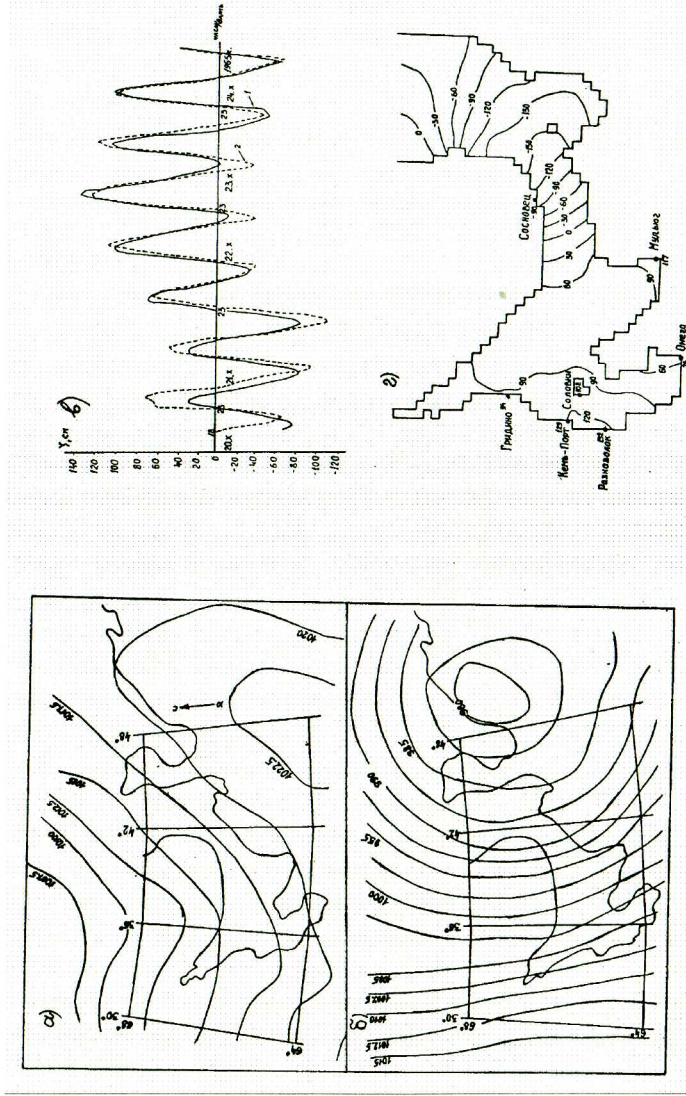


Рисунок 6 – Барическая ситуация в момент стонных понижений уровня (а), максимальных ветров над морем (б) и суммарные уровни (в, г) при штормовом нагоне 20 – 23.10.1965 г.: в – временный ход наблюдаемых (1) и рассчитанных (2) уровней в п. Кемь-Порт, г – положение рассчитанного суммарного уровня моря в 04 ч 23.10.1965 г. (числами возле станций обозначены наблюдаемые значения уровня в сантиметрах от невозмущенного положения уровня).

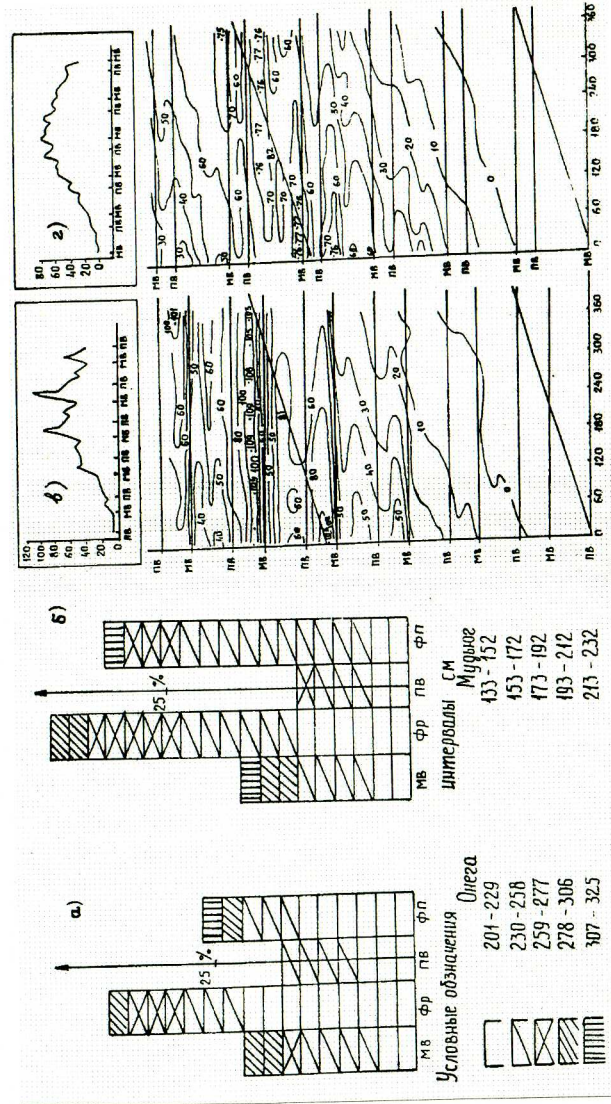
длинную волну, скорость распространения которой на начальном этапе значительно превышает скорость перемещения самих циклонов; б) эта свободная нагонная волна затем снижает скорость и распространяется из Баренцева в Белое море в виде волны Кельвина; в) по мере распространения в Белом море она изменяет направление и претерпевает существенные деформации в связи с ее взаимодействием с приливами, с рельефом дна и берегами; г) Белое море к моменту достижения гребня нагонной волны вершин заливов оказывается в тыловой части циклона в зоне экстремальных ветров северо-западных направлений (рис. 6б). Последние в южных районах моря вызывают повышение уровня, которое, накладываясь на индуцированный баренцевоморский нагон, приводит к возникновению максимальных уровней в Онежском, Двинском и, иногда, Мезенском заливах; д) в формирование максимальных уровней доминирующий вклад вносит индуцированная нагонная волна; е) влияние градиентов приземного атмосферного давления незначительно; ж) в формирование нагонных уровней в Мезенском, Онежском и Двинском заливах существенный вклад может внести взаимодействие между приливом и нагоном. При циклонах данного типа в северных и северо-западных районах моря вследствие разнонаправленности воздействия индуцированного нагона и локальных ветров величина нагонов значительно меньше, чем в южных районах. В отличие от “ныряющих”, западные циклоны, перемещающиеся с центром над Баренцевым морем, формируют более ярко выраженный преднагонный сгон, который в этих случаях вызывается чаще всего сгонными ветрами.

При западных циклонах, перемещающихся с центром над Белым морем в формировании уровня проявляются следующие особенности: а) действие ветра, движущегося циклона, вначале вызывает сгон, а потом нагон в южных районах моря и, наоборот, нагон, а потом сгон в его северных районах; б) в нагонных повышениях уровня доминирует ветровая составляющая; в) нагонные повышения уровней наблюдаются раньше в Онежском заливе, чем в Двинском и Мезенском; г) форма кривых хода нагонных уровней имеет более сглаженный гребень, обычно наблюдающийся при нагонах, вызванных ветром; д) влияние взаимодействия между приливом и нагоном незначительно; е) роль градиента атмосферного давления возрастает, а в северной части Онежского залива, Бассейне и Горле может иногда преобладать. При этом повышение роли атмосферного давления не в полной мере обусловлено статическим эффектом, поскольку, сдвиг фаз в колебаниях уровня и атмосферного давления в этой частотной области (периоды 3–5 суток) незначителен.

Наблюдаемые сравнительно редко циклоны южного типа, углубляясь, смещаются из центральных районов ЕТР к северу и проходят Белое море восточнее или юго-восточнее. Последнее, оказываясь на западной или северо-западной периферии циклона, подвергается влиянию северо-западных или северных ветров, вызывающих не слишком высокие нагоны в южных и незначительные сгоны в северных районах. В формировании уровней преобладающий вклад вносит ветер, а роли градиента атмосферного давления и взаимодействия между приливом и нагоном незначительны. В момент максимума нагона в южных районах моря центр циклона располагается восточнее Белого моря в зоне, ограниченной 62–69° с.ш. и 45–55° в.д. и заполняется.

Траектория аномально смещающихся циклонов весьма разнообразна. В циклонах такого типа ветры северных румбов вызывают нагоны в южных и сгоны в северных районах моря, не достигающих экстремальных значений. В формировании нагонов преобладает вклад ветра. Вклад градиентов атмосферного давления сильно колеблется, но обычно незначителен. Вклад нелинейного взаимодействия между приливом и нагоном заметно варьирует, но этот вклад меньше, чем при нагонах, обусловленных “ныряющими” и западными циклонами, перемещающимися с центром над Баренцевым морем.

В пятой главе исследуется нелинейное взаимодействие между приливами и штормовыми нагонами. До настоящего времени оно изучалось по трем направлениям: статистический анализ материалов наблюдений, построение аналитических моделей и численное гидродинамическое моделирование. В настоящей работе использован статистический метод и применен нетривиальный подход, так называемый метод “параллельных моделей” (Prandle, Wolf, 1978, а; 1978, б). На основе анализа формирования штормовых нагонов в различных пунктах за тридцатилетний период и гидродинамического моделирования, в Белом море идентифицировано нелинейное взаимодействие, которое проявляется в асимметрии повторяемости максимума нагона относительно фаз прилива (рис. 7), т.е. пик нагона при всех сдвигах фаз между приливом и нагоном имеет тенденцию появляться в фазе роста. Изменение величины повышений уровня в зависимости от фазового сдвига между приливом и нагоном для нагонов трехсуточной продолжительности составляет 2–8%, а для суммарных уровней – 1–6%. В зависимости от фазового соотношения между приливом и нагоном существенно меняется время наступления пика нагонных и суммарных уровней, причем это изменение достигает в пределе 12 ч (рис. 7в – 7г).



а, б – по данным наблюдений (значения в сантиметрах даны от “нулей” постов); е, з – рассчитанные по модели нагонные уровни (значения в сантиметрах от невозмущенного состояния уровня) в пунктах Онега (е) и Мудзьюг (з) при различных сдвигах фаз между приливом и нагоном (на врезках даны временные профили нагонных уровней в соответствующих пунктах при фазовом сдвиге 60°)

Рисунок 7 – Распределение пика нагонных уровней в пунктах Онега (а, е) и Мудзьюг (б, з) относительно фаз прилива.

Сущность предложенного Прэндлом и Вольф в работах (Prandle, Wolf, 1978, а; 1978, б) и примененного в настоящей работе подхода “параллельных моделей” состоит в следующем. В методе предполагается, что суммарные (нагон + прилив) уровни и скорости на всей пространственно-временной расчетной области должны удовлетворять соотношениям:

$$\zeta_c = \zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}} \quad (7)$$

$$u_c = u_{\Pi} + u_{\text{H}} \quad (8)$$

$$v_c = v_{\Pi} + v_{\text{H}} \quad (9)$$

где индекс С означает значение вычисленных по суммарной “прилив + нагон” модели, а Π и H соответственно по приливной и нагонной частям модели. Подставив (7)–(9) в уравнения движения и неразрывности (3)–(6), получим следующие уравнения для суммарного распространения приливов и нагона:

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_{\Pi} + u_{\text{H}}) = f(v_{\Pi} + v_{\text{H}}) - g \frac{\partial(\zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\tau_x^{\text{ПОВ}}}{\rho(H + \zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})} - \frac{r(u_{\Pi} + u_{\text{H}})}{(H + \zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})} \left[(u_{\Pi} + u_{\text{H}})^2 + (v_{\Pi} + v_{\text{H}})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(v_{\Pi} + v_{\text{H}}) = f(u_{\Pi} + u_{\text{H}}) - g \frac{\partial(\zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\tau_y^{\text{ПОВ}}}{\rho(H + \zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})} - \frac{r(v_{\Pi} + v_{\text{H}})}{(H + \zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})} \left[(u_{\Pi} + u_{\text{H}})^2 + (v_{\Pi} + v_{\text{H}})^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(H + \zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})(u_{\Pi} + u_{\text{H}})] + \frac{\partial}{\partial y} [(H + \zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})(v_{\Pi} + v_{\text{H}})] = 0 \quad (12).$$

Допущение, сделанное в методе “параллельных моделей”, заключается в том, что уравнения (10)–(12) могут быть разделены на две части и для прилива будут иметь вид:

$$\frac{\partial u_{\Pi}}{\partial t} = f v_{\Pi} - g \frac{\partial \zeta_{\Pi}}{\partial x} - \frac{r u_{\Pi}}{(H + \zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})} \left[(u_{\Pi} + u_{\text{H}})^2 + (v_{\Pi} + v_{\text{H}})^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial v_{\Pi}}{\partial t} = -f v_{\Pi} - g \frac{\partial \zeta_{\Pi}}{\partial y} - \frac{r v_{\Pi}}{(H + \zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})} \left[(u_{\Pi} + u_{\text{H}})^2 + (v_{\Pi} + v_{\text{H}})^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \zeta_{\Pi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(H + \zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}}) u_{\Pi}] + \frac{\partial}{\partial y} [(H + \zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}}) v_{\Pi}] = 0 \quad (15)$$

а для нагонов будут выглядеть следующим образом:

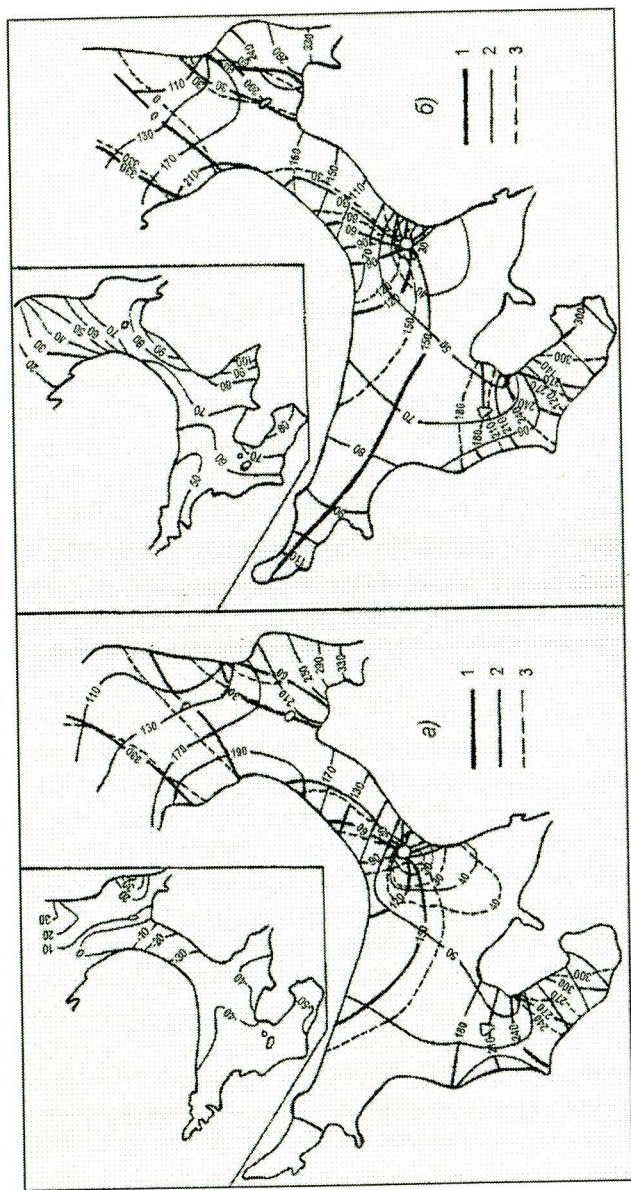
$$\frac{\partial u_{\text{H}}}{\partial t} = f v_{\text{H}} - g \frac{\partial \zeta_{\text{H}}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\tau_x^{\text{ПОВ}}}{\rho(H + \zeta_{\text{H}} + \zeta_{\Pi})} - \frac{r u_{\text{H}}}{(H + \zeta_{\text{H}} + \zeta_{\Pi})} \left[(u_{\text{H}} + u_{\Pi})^2 + (v_{\text{H}} + v_{\Pi})^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$\frac{\partial v_{\text{H}}}{\partial t} = -f u_{\text{H}} - g \frac{\partial \zeta_{\text{H}}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\tau_y^{\text{ПОВ}}}{\rho(H + \zeta_{\text{H}} + \zeta_{\Pi})} - \frac{r v_{\text{H}}}{(H + \zeta_{\text{H}} + \zeta_{\Pi})} \left[(u_{\text{H}} + u_{\Pi})^2 + (v_{\text{H}} + v_{\Pi})^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \zeta_{\text{H}}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(H + \zeta_{\text{H}} + \zeta_{\Pi}) u_{\text{H}}] + \frac{\partial}{\partial y} [(H + \zeta_{\text{H}} + \zeta_{\Pi}) v_{\text{H}}] = 0 \quad (18)$$

При вычислении приливов по уравнениям (13)–(15) нагонные составляющие ζ_{H} , u_{H} , v_{H} в эти уравнения на каждом временном шаге вводятся из “параллельно” ведущихся расчетов по уравнениям (16)–(18) нагонной части модели, в которые в свою очередь приливные составляющие ζ_{Π} , u_{Π} , v_{Π} вводятся из приливной части модели. С помощью метода “параллельных моделей” проведен расчет исторических сгона и последовавшего затем экстремального штормового нагона, наблюдавшихся в Белом море с 20 по 24 октября 1965 г. Выполнены расчеты: 1) прилива без влияния нагона (Π); 2) нагона без влияния прилива (H); 3) прилива, деформированного (вследствие взаимодействия) нагоном (Π'); 4) нагона, деформированного приливом (H'); 5) суммарных уровней и течений по модели суммарных уровней и течений ($\Pi + \text{H}$). Параметр взаимодействия (Герман, Левиков, 1983) определяется как разность между рассчитанным по соответствующей модели суммарным (прилив + нагон) уровнем, ζ_c и суммой отдельных составляющих, полученных по модели для приливов, ζ_{Π} , и модели для “чистого” нагона ζ_{H} , т.е. $\xi_{\text{в}} = \zeta_c - (\zeta_{\Pi} + \zeta_{\text{H}})$. Удовлетворение результатов расчетов по приливной и нагонной частям модели условиям (7)–(9) проверялось по соответствующим результатам, полученным по модели суммарных уровней. Для проверки корректности последних использовались наблюдаемые на береговых станциях ежечасные значения уровней и упомянутые выше критерии точности.

Получено, что параметр взаимодействия между приливом и нагоном приблизительно прямо пропорционален величинам прилива и нагона. Нелинейное взаимодействие меняет режим прилива в Белом море в продолжение действия нагона: во время сгонных понижений имеет место разворот по часовой стрелке амфидромических систем (запаздывание во времени характерных фаз приливного цикла, что объясняется уменьшением фазовой скорости из-за уменьшения суммарной глубины), а во время нагона – против часовой стрелки (характерные фазы приливного цикла наступают раньше (из-за увеличения фазовой скорости приливной волны при увеличении суммарной глубины) (рис. 8). Это изменение приливного режима можно учесть при предвычислении приливов во время значительных штормовых нагонов.



а – в период стонных понижений (с 14.00 21.10 до 2.30 22.10.1965 г.): 1 – фазы, град., 2 – амплитуды, см, 3 – изофазы и изоамплитуды до начала шторма. На врезке – непериодическая составляющая уровня в момент максимума стонных понижений; б – в период, охватывающий пик нагонных уровней (с 16.00 22.10 по 4.30 23.10.1965 г.): 1 – фаза, град, 2 – амплитуда, см, 3 – фаза в период стога. На врезке – непериодическая составляющая уровня в момент пика нагона на Мудьюге.

Рисунок 8 – Изофазы и изоамплитуды приливной волны M_2 в период стонов и нагонов.

Доминирующий вклад во взаимодействие вносит квадратичное придонное трение. Только в Онежском заливе эффект мелководности сравним с эффектом придонного трения.

Шестая глава посвящена изучению крупномасштабных колебаний уровня моря: исследованы закономерности и получены характеристики сезонной и межгодовой изменчивости, в том числе характеристики длиннопериодных приливов (“полюсного” и лунно-деклинационного). Отмечено, что сезонные колебания уровня Белого моря характеризуются в целом наличием основного максимума в октябре и основного минимума в феврале. По характеру сезонного хода и роли различных факторов выделены три типа:

- первый тип – максимум в октябре и минимум, в основном, в феврале. К нему относятся почти все уровенные посты Бассейна и Кандалакшского залива. Величина колебаний 15–19 см, основная причина сезонных вариаций – мусонная циркуляция атмосферы;
- второй тип – кроме основного максимума в октябре и основного минимума в феврале имеет еще два хорошо выраженных максимума в июне – июле и марте и два минимума в апреле и в августе. Величина годового хода – 17–21 см. Этот тип с более ярко выраженными вторичными экстремумами наблюдается в районах, где наряду с воздействием мусонной циркуляции атмосферы усиливается влияние материкового стока и результирующего водообмена с Баренцевым морем (Двинской, Онежский, Мезенский заливы и Горло);
- третий тип – два максимума (в мае и октябре) и два минимума (в августе и в марте) имеет место в устьевых областях крупных рек (Северной Двины, Онеги). В этих районах наблюдаются максимальные в Белом море величины годового хода. Основной фактор – речной сток.

Вклад сезонных вариаций осадков в изменчивость такого же масштаба уровня моря довольно значителен и может составить до 3,8 см (18–25% от сезонных колебаний уровня).

Для оценки “полюсного прилива” с четырнадцатимесячным периодом использован метод “разделительных таблиц” Дарвина (Максимов, 1970, а). Результаты расчетов показали, что амплитуда “полюсного” прилива изменяется от 1,2 до 4,3 см за промежуток времени около 18 лет (рис. 9). Полученные для отдельных пунктов фазы полюсного прилива в большинстве случаев подтверждают теоретическое положение о распространении данной волны прилива с запада на восток. Например, для Жижгина средний “котидальный месяц” (промежуток времени между моментами прохождения мгновенным полюсом вращения Земли через меридиан

Гринвича и формирования максимума волны полюсного прилива) составил 12,8 месяцев, а для Сосновца – более 12,9 месяцев. Средний по пунктам “котидальный месяц” волны полюсного прилива за 1950–1980 г.г. оказался равным 12,9 месяцам.

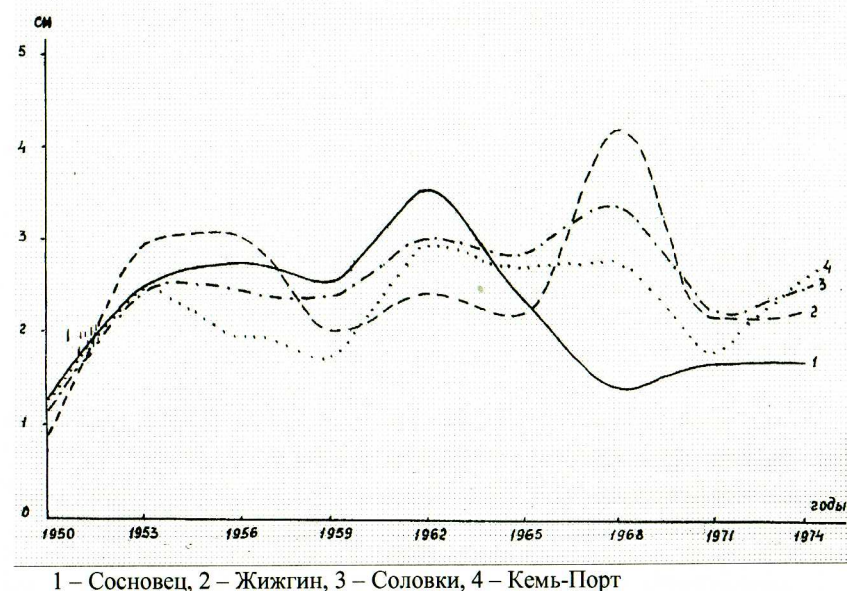


Рисунок 9 – Временной ход амплитуд полюсного прилива в Белом море.

Межгодовые вариации максимальны в вершинах Онежского и Двинского заливов, а минимальны – на севере Бассейна; в этих вариациях значимо влияние атмосферного давления, с доминированием статической составляющей; воздействие материкового стока ограничивается устьями крупных рек и вдали от них незначительно; вклад длиннопериодных приливов незначителен за исключением “полюсного” прилива с четырнадцатимесячным периодом, амплитуда которого изменяется от 1 до 4 см за промежутки времени около 18 лет.

Тренды уровня в различных пунктах имеют разную величину: в пунктах, расположенных по Карельскому, Кандалакшскому и Терскому берегам, понижаются от ст. Гридино до ст. Кашкаранцы со средней скоростью около 3,0 мм/год, далее до ст. Сосновец, а также в пунктах по побережью Онежского залива, – со средней скоростью 2,0 мм/год (таблица 3). Наибольшая величина тренда уровня моря отмечается в районе Карельского берега (более 5 мм/год). Основной вклад в линейный тренд

уровня Белого моря вносят современные тектонические движения его берегов, за исключением Двинского залива, где преобладает вклад изменений речного стока.

Таблица 3
Линейный тренд уровня моря в пунктах Белого моря и вклад в него различных составляющих (мм/год)

Пункт	Период наблюдений	Скорость тренда наблюдаемого уровня моря	Коэффициент детерминации	Тренд уровня Мирового океана	Вклад речного стока	Вклад разности (Осадки–испарение)	Вклад скорости вертикальных движений берегов
Кандалакша	1948-1985	-2,12	0,759	+1,5	0,0	±0,05	-3,62±0,05
Умба	1934-1985	-2,46	0,793	+1,5	0,0	±0,05	-3,96±0,05
Кашкаранцы	1954-1985	-2,72	0,709	+1,5	-0,5	±0,05	-3,72±0,05
Чаваньга	1952-1985	-1,22	0,528	+1,5	-0,5	±0,05	-2,22±0,05
Сосновец	1936-1985	-1,51	0,429	+1,5	-0,5	±0,05	-2,51±0,05
Мудьюг	1937-1985	+0,56	0,026	+1,5	-1,1	±0,05	+0,16±0,05
Северодвинск	1939-1985	-0,62	0,195	+1,5	-1,1	±0,05	-1,12±0,05
Унский маяк	1959-1985	+1,04	0,170	+1,5	-1,0	±0,05	+0,54±0,05
Жижгин	1939-1985	-1,89	0,534	+1,5	-0,5	±0,05	-2,89±0,05
Онега	1946-1985	-1,64	0,320	+1,5	+2,3	±0,05	-5,54±0,05
Разнаволоок	1921-1985	-1,6	0,635	+1,5	+1,2	±0,05	-4,3±0,05
Кемь Порт	1920-1985	-1,82	0,723	+1,5	+1,0	±0,05	-4,32±0,05
Соловки	1924-1985	-1,40	0,587	+1,5	0,0	±0,05	-2,9±0,05
Гридино	1947-1985	-2,25	0,824	+1,5	0,0	±0,05	-3,75±0,05
Ковда	1947-1985	-3,92	0,923	+1,5	0,0	±0,05	-5,42±0,05

В седьмой главе исследуется режим экстремальных уровней, включая также режим максимальных и минимальных уровней редкой повторяемости. Используя робастные методы математической статистики (Мостеллер, Тьюки, 1982), получены устойчивые статистические характеристики экстремальных уровней. Оказалось, что наибольшие в году среднемноголетние месячные максимумы во всех пунктах моря наблюдаются в октябре, а наименьшие в большинстве пунктов – в апреле – мае. Максимум максимумов в различных пунктах наблюдается в разные месяцы, свидетельствуя о существенном вкладе локальных факторов в формирование максимальных уровней. Наименьшие в году месячные минимумы наблюдаются в зимние месяцы и связаны с муссонной

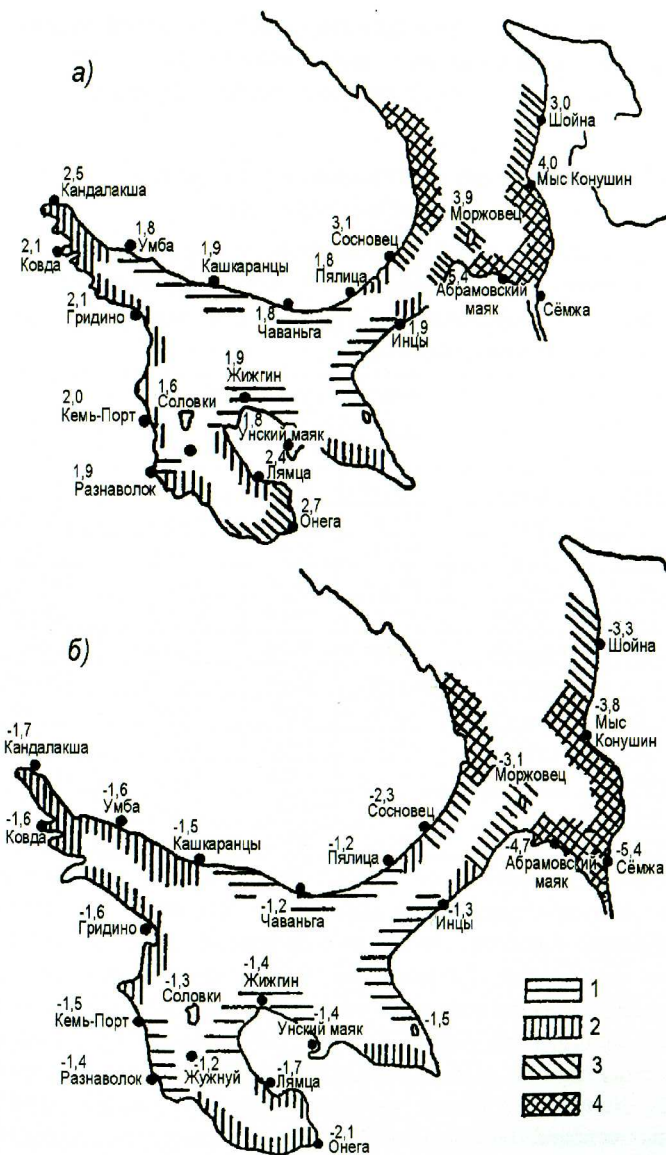
циркуляцией воздуха. Минимум миниморум в большинстве пунктов также наблюдаются зимой. Изменчивость экстремальных уровней: наиболее сильна в вершине Онежского залива, далее – в Двинском и Кандалакшском заливах, а слаба – в Бассейне и Горле; зимой существенно выше, чем в другие сезоны.

Изменчивость максимальных уровней значительно выше изменчивости минимальных, что обусловлено различием условий их формирования. Отклонения месячных максимумов от среднего за многолетний период уровня превышают по абсолютной величине соответствующие отклонения минимумов, и это наиболее сильно выражено в вершинах заливов и Горле моря. При исключении сезонного хода среднего уровня моря амплитуды годового хода месячных максимумов и минимумов равны, а соответствующие кривые находятся в противофазе.

Применяя метод, основанный на статистическом анализе годовых экстремумов и базирующийся на асимптотической теории экстремальных значений (Герман, 1971), построены функции распределения экстремальных уровней и выявлено, что региональные функции распределения их в Белом море, в основном, соответствуют первому предельному распределению. Рассчитаны максимальные и минимальные уровни редкой повторяемости, выполнено географическое районирование моря по величинам экстремальных уровней (рис. 10). По значениям максимальных отклонений уровня от невозмущенного состояния один раз в 100 лет выделены четыре типа: с маленькими (до 2 м), умеренными (2–3 м), значительными (3–4 м) и очень высокими (4–6,5 м) отклонениями максимального уровня, встречающиеся по побережьям девяти отдельных районов. Относительный вклад приливов и нагонов в формирование максимальных уровней в этих районах (даже с однотипными отклонениями) существенно отличается (табл. 4).

По значениям отклонений минимального уровня от невозмущенного состояния 1 раз в 100 лет также выделено четыре типа: с незначительными (до -1,5 м), умеренными (-1,5...-2,5 м), значительными (-2,5...-3,5 м) и очень сильными (-3,5...-5,5 м) отклонениями минимального уровня. Относительный вклад отлива и сгонов в формирование минимального уровня сильно зависит от района моря.

Восьмая глава посвящена исследованию влияния крупных гидротехнических сооружений, а именно, строительства проектируемой приливной электростанции (ПЭС) в Мезенском заливе, на режим среднemasштабных колебаний уровня Белого моря. Численные расчеты по воспроизведению существующих колебаний уровня этого масштаба с целью оценки изменений



Для максимумов: 1 – до 2 м; 2 – 2...3 м; 3 – 3...4 м; 4 – 4...6,5 м;
 для минимумов: 1 – до -1,5 м; 2 – -1,5...-2,5 м; 3 – -2,5...-3,5 м; 4 – -3,5...-5,5 м

Рисунок 10 – Распределение повышения (а) и понижения (б) уровня моря повторяемостью один раз в 100 лет.

их режима при строительстве проектируемой приливной электростанции в Мезенском заливе Белого моря выполнены с использованием разработанной нами в главе IV гидродинамической модели.

Таблица 4

Значения отдельных составляющих экстремальных уровней редкой повторяемости

$h_{ВПВ}$, $h_{НМВ}$ – соответственно наивысший и наинизший возможный по астрономическим условиям прилив и отлив; h_N – отклонения уровня за счет нагона; $h_{СТ}$ – отклонения уровня за счет изменения стока реки; h_C – отклонения уровня за счет сгона

№	пункты наблюдений	составляющие	максимальных 1 раз в 100 лет		составляющие	минимальных 1 раз в 100 лет	
			см	%		см	%
1	Кандалакша	$h_{ВПВ}/h_N$	146/101	59/41	$h_{НМВ}/h_C$	-143/-25	85/15
2	Умба	$h_{ВПВ}/h_N$	113/61	65/35	$h_{НМВ}/h_C$	-111/-43	72/28
3	Сосновец	$h_{ВПВ}/h_N$	228/84	73/27	$h_{НМВ}/h_C$	-221/-27	89/11
4	Мудьюг	$h_{ВПВ}/h_N+h_{СТ}$	58/157	27/73	$h_{НМВ}/h_C$	-64/-84	43/57
5	Унский маяк	$h_{ВПВ}/h_N$	62/120	34/66	$h_{НМВ}/h_C$	-62/-80	44/56
6	Жижгин	$h_{ВПВ}/h_N$	72/116	38/62	$h_{НМВ}/h_C$	-75/-60	56/42
7	Онега	$h_{ВПВ}/h_N+h_{СТ}$	171/197	45/54	$h_{НМВ}/h_C$	-150/-60	71/29
8	Разнаволок	$h_{ВПВ}/h_N$	83/110	43/57	$h_{НМВ}/h_C$	-94/-47	67/33
9	Кемь-Порт	$h_{ВПВ}/h_N+h_{СТ}$	97/107	48/52	$h_{НМВ}/h_C$	-101/-53	66/34
10	Соловки	$h_{ВПВ}/h_N$	51/108	32/68	$h_{НМВ}/h_C$	-55/-71	44/56
11	Гридино	$h_{ВПВ}/h_N$	111/97	53/47	$h_{НМВ}/h_C$	-108/-51	68/32
12	Ковда	$h_{ВПВ}/h_N$	124/88	58/42	$h_{НМВ}/h_C$	-120/-40	75/25

Поскольку изменение геометрии бассейна, его морфометрических свойств, условий отражения и диссипации входящей приливной волны перестраивают характер приливных движений даже на значительном удалении от дамбы, то решение задачи оценки влияния ПЭС на приливные движения, невозможно получить по типу обычных краевых задач (Greenberg, 1980; Горелков, 1982; Некрасов, 1990). Таким образом, для решения данной задачи появляется проблема условий на открытой границе. Данная проблема решена с использованием импедансных граничных условий (Некрасов, 1975; 1990, Greenberg, 1980; Горелков, 1982) на “жидкой” границе расчетной области, что позволяет учитывать излучение через открытую границу дополнительных волновых возмущений, порождаемых как отраженными от дамбы волнами, так и нелинейными эффектами внутри области, и обеспечивать, таким образом, выполнение энергетического баланса моделируемых процессов.

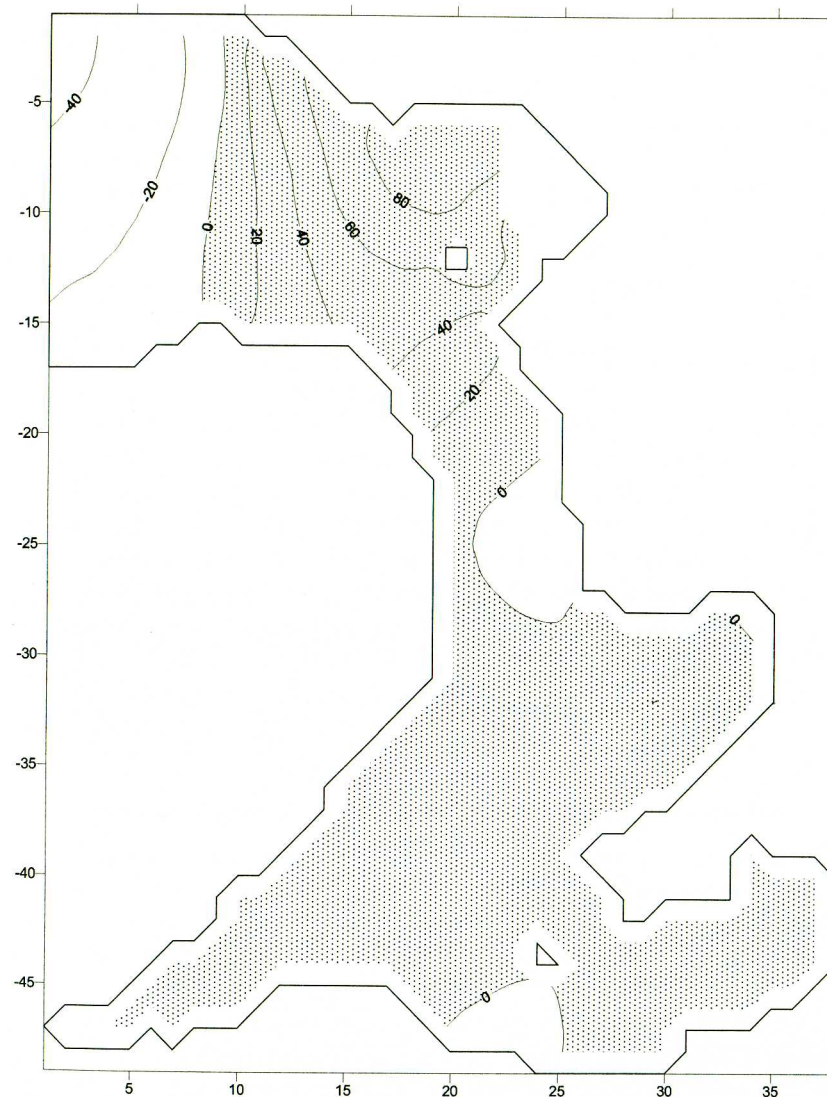


Рисунок 11 – Трансформация амплитуд (см) приливной волны M_2 при наличии плотины ПЭС.

Расчеты показали, что строительство ПЭС в Мезенском заливе, в основном, приводит к увеличению доли отраженной из Белого в Баренцево море волны и, таким образом, к уменьшению чистого волнового потока



Рисунок 12 – Трансформация фаз (град.) приливной волны M_2 при наличии дамбы ПЭС

в Белое море энергии короткопериодных колебаний, а также к увеличению последнего, направленного из Воронки в Горло и далее в Бассейн моря. Изменения параметров короткопериодных колебаний уровня, обусловленные

влиянием строительства ПЭС, в отдельных районах моря весьма существенны; происходит изменение амплитуд и фаз в основном в Воронке и Мезенском заливе (рис. 11, 12): на средней и южной части Воронки, в северо-восточной части Горла и в Мезенском заливе происходит увеличение амплитуд приливных колебаний (наиболее значительное увеличение, например, амплитуды волны M_2 до 80–90 см или до 70% от существующих в этом районе произойдет в восточной части Мезенского залива у Конушинского берега и в юго-восточной части Воронки), а в северной части Воронки и на границе между Белым и Баренцевым морями – уменьшение (для амплитуды волны M_2 от 10 см у мыса Св. Нос до 40 см у м. Канин Нос). На остальной части Белого моря существенных изменений амплитуд приливных колебаний не происходит. Изменения фаз приливных колебаний также наиболее существенны для районов Воронки, Мезенского залива и северо-восточной части Горла (рис. 12): в южной части Воронки, в северо-восточной части Горла и Мезенском заливе происходит сдвиг фаз прилива в сторону более раннего наступления; в средней и северной частях Воронки наблюдается сдвиг приливных фаз в сторону запаздывания. На границе между Горлом и Бассейном ожидается незначительное изменение характерных фаз прилива в сторону запаздывания, а в Онежском заливе (в районе Лямецкого берега) – в сторону опережения; в остальных районах заметных изменений приливных фаз не происходит.

Основные результаты диссертационной работы следующие:

1. Впервые обобщены все имеющиеся сведения и дан детальный анализ процессов формирования уровня Белого моря по широкому диапазону его изменчивости, выявлено влияние на уровень моря комплекса гидрометеорологических, астрономических, геофизических и техногенных факторов.

2. Получены режимно-статистические характеристики сгонно-нагонных колебаний за многолетний период. Определена связь колебаний уровня с метеорологическими факторами в синоптическом диапазоне частот. В вариациях уровня моря и метеорологических элементов выявлена периодичность от 4-х до 9-ти суток, обусловленная прохождением циклонов и антициклонов. При оценке метеофакторов в процессе колебаний уровня установлено преобладание влияния ветра в южных районах моря и относительный рост вклада атмосферного давления в Бассейне и Горле моря, что обусловлено различием морфометрических условий в этих

районах и положением последних относительно центра перемещающихся преимущественно с запада на восток циклонов. В то же время показано, что в одном и том же районе роль ветра и атмосферного давления может существенно меняться в зависимости от синоптической обстановки.

3. Обнаружено, что в низкочастотной области (9–30 суток) колебания уровня и атмосферного давления находятся в противофазе, свидетельствуя о доминирующей роли на этих частотах эффектов “обратного барометра”. На более высоких частотах (период колебаний 3–5 суток) сдвиг фаз в колебаниях уровня и давления незначителен, что свидетельствует о возрастании на этих частотах динамических факторов.

4. Уточнена типизация циклонов применительно к изучению сгонно-нагонных колебаний. Исходя из особенностей механизма формирования штормовых нагонов, циклоны, вызывающие их, по траекториям своего движения подразделяются на: 1) “ныряющие”; 2) западные циклоны, проходящие с центром над Баренцевым морем; 3) западные циклоны, проходящие с центром над Белым морем; 4) южные; 5) аномально смещающиеся. При первых двух типах циклонов наблюдается одинаковый механизм формирования нагонов и в формирование максимальных уровней доминирующий вклад вносит индуцированная нагонная волна, с ним сравнима роль ветра, может оказаться существенным влияние взаимодействия между приливом и нагоном. При циклонах западных с центром над Белым морем, южных и аномально смещающихся преобладает влияние ветра. При циклонах западных с центром над Белым морем заметно возрастает роль атмосферного давления, но это повышение не в полной мере обусловлено статическим эффектом, поскольку сдвиг фаз в колебаниях уровня и атмосферного давления в этой частотной области незначителен.

5. Показано, что сейшевые колебания могут внести существенный вклад в вариации уровней и на большей части моря превысить вклад сезонных и межгодовых составляющих. Получены частотные и пространственные характеристики резонансных осцилляций, соответствующих первым пяти модам сейшевых колебаний уровня Белого моря. Период колебаний, соответствующих основной одноузловой сейше, равен 35,7 ч, а величина их может достигать до 1,25 м в вершине Онежского залива, до 1 м в вершинах Кандалакшского и Двинского заливов и до 0,7 м в Бассейне и Мезенском заливе. Периоды колебаний, соответствующих 2-х, 3-х, 4-х и 5- узловым сейшам, составляют соответственно 18,5; 12,5, 7,5 и 6 ч. Наиболее высокая величина колебаний, соответствующих сейшам от первой до пятой моды, может достигать 1,6 м для 4-й моды и приходится на вершину Мезенского залива. Однако на остальной части

Белого моря величины колебаний для 4-й моды незначительны и находятся в пределах 0,1–0,2 м.

6. Базируясь на статистическом анализе данных наблюдений и численном гидродинамическом моделировании в Белом море идентифицировано явление нелинейного взаимодействия между приливами и нагонами. Для оценки вклада различных факторов и исследования механизма взаимодействия разработана численная модель Белого моря, на основе так называемого метода “параллельных моделей”, с помощью которой одновременно оценивается влияние нагона на прилив и влияние прилива на нагон.

7. На основе метода “параллельных моделей” оценена и показана достаточно высокая роль взаимодействия между приливом и нагоном в среднемасштабных колебаниях уровня; взаимодействие наиболее выражено в Мезенском, Онежском и Двинском заливах и может привести к увеличению нагонной составляющей до 27–38%. Оно также приводит к изменчивости приливного режима с синоптическим масштабом времени. Параметр взаимодействия прямо пропорционален величинам нагона и прилива, зависит от частотных и фазовых соотношений между ними. Доминирующий вклад в процесс взаимодействия вносит квадратичное придонное трение, лишь в Онежском заливе эффект мелководности сравним с эффектом придонного трения.

8. Установлены основные закономерности и получены характеристики крупномасштабной изменчивости уровня; показано, что в них преобладают сезонные и межгодовые вариации. По характеру сезонного хода и роли различных факторов выделены три типа, которым соответствуют три района:

первый тип – максимум в октябре и минимум, в основном, в феврале. Он отмечается почти на всех уровнях постах Бассейна и Кандалакшского залива. Величина этих колебаний составляет 15–19 см, основная причина сезонных вариаций – мусонная циркуляция атмосферы;

второй тип – кроме основного максимума в октябре и основного минимума в феврале имеет еще два хорошо выраженных максимума в июне – июле и марте и два минимума в апреле и в августе. Величина годового хода – 17–21 см. Этот тип с более ярко выраженными вторичными экстремумами наблюдается в районах, где наряду с воздействием мусонной циркуляции атмосферы усиливается влияние материкового стока и результирующего водообмена с Баренцевым морем (Двинской, Онежский, Мезенский заливы и Горло);

третий тип – два максимума (в мае и октябре) и два минимума (в августе и в марте) – имеет место в устьевых областях крупных рек (Северной

Двины, Онеги). В этих районах наблюдаются максимальные в Белом море величины годового хода. Основной фактор – речной сток.

9. Межгодовые вариации максимальны в вершинах Онежского и Двинского заливов, а минимальны – на севере Бассейна; в этих вариациях значимо влияние атмосферного давления, с доминированием статической составляющей; воздействие материкового стока ограничивается устьями крупных рек и вдали от них незначительно; вклад длиннопериодных приливов незначителен за исключением “полюсного” прилива с четырнадцатимесячным периодом, амплитуда которого изменяется от 1 до 4 см за промежуток времени около 18 лет. Установлено, что в линейный тренд уровня основной вклад вносят современные тектонические движения его берегов, за исключением Двинского залива, где преобладает вклад изменений речного стока.

10. Показано, что по всему побережью Белого моря экстремальные отклонения уровня от среднего могут достигать достаточно больших значений. В различных районах моря значения экстремальных отклонений очень сильно отличаются друг от друга, что обусловлено различием приливного режима в разных районах моря, очертаниями берегов и глубиной места, приводящим к различной реакции вод в отдельных районах на относительно сходные синоптические процессы над всем морем. Почти для всех пунктов побережья моря эмпирические функции распределения экстремумов соответствуют первому предельному распределению. Изменчивость максимальных уровней значительно выше изменчивости минимальных, что обусловлено различием условий их формирования. По значениям отклонений максимальных уровней от невозмущенного состояния один раз в 100 лет выделены четыре типа: с малыми (до 2 м), умеренными (2–3 м), значительными (3–4 м) и очень высокими (4–6,5 м) отклонениями максимального уровня. Указанные типы встречаются по побережьям девяти отдельных районов. Относительный вклад приливов и нагонов в формирование максимальных уровней в этих районах (даже с однотипными отклонениями) существенно отличается. По значениям отклонений минимального уровня от невозмущенного состояния 1 раз в 100 лет также выделяется четыре типа: с незначительными (до -1,5 м), умеренными (-1,5...-2,5 м), значительными (-2,5...-3,5 м) и очень сильными (-3,5...-5,5 м) отклонениями минимального уровня. Относительный вклад отлива и сгонов в формирование минимального уровня сильно зависит от района моря.

11. Выполнена оценка влияния строительства проектируемой ПЭС в Мезенском заливе на режим среднемасштабных вариаций уровня Белого

моря. Установлено, что строительство ПЭС в Мезенском заливе, в основном, приводит к увеличению доли отраженной из Белого в Баренцево море длинной волны и, таким образом, к уменьшению чистого волнового потока в Белое море энергии длинноволновых колебаний, а также к увеличению волнового потока, направленного из Воронки в Горло и далее в Бассейн моря. Изменение амплитуд и фаз происходит в основном в Воронке и Мезенском заливе: на средней и южной части Воронки, в северо-восточной части Горла и в Мезенском заливе происходит увеличение амплитуд приливных колебаний (наиболее значительное увеличение, например, амплитуды волны M_2 до 80–90 см или до 70% в этом районе произойдет в восточной части Мезенского залива у Конушинского берега и в юго-восточной части Воронки), а в северной части Воронки и на границе между Белым и Баренцевым морями – уменьшение (для амплитуды волны M_2 от 10 см у мыса Св. Нос до 40 см у м. Канин Нос). На остальной части Белого моря существенных изменений амплитуд приливных колебаний не происходит. Изменения фаз приливных колебаний также наиболее существенны для районов Воронки, Мезенского залива и северо-восточной части Горла: в южной части Воронки, в северо-восточной части Горла и Мезенском заливе происходит сдвиг фаз прилива в сторону более раннего наступления; в средней и северной частях Воронки наблюдается сдвиг приливных фаз в сторону запаздывания. На границе между Горлом и Бассейном ожидается незначительное изменение характерных фаз прилива в сторону запаздывания, а в Онежском заливе (в районе Лямецкого берега) – в сторону опережения; в остальных районах заметных изменений приливных фаз не происходит.

Список основных работ по теме диссертации

1. Инжебейкин Ю.И. Колебания уровня Белого моря. Екатеринбург, Изд. УрО РАН, 2003. 152 с.
2. Инжебейкин Ю.И., Кравец А.Г. Уровень моря / Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Л: Гидрометиздат, 1989-1992. Т II. Белое море. Вып. I. Гидрометеорологические условия. 1991. С. 99-122.
3. Инжебейкин Ю.И. Сезонные и межгодовые колебания уровня Белого моря // Вестник ПГУ, №1. Архангельск, 2004.
4. Инжебейкин Ю.И. О результатах численных исследований собственных колебаний уровня Белого моря // Вестник ПГУ, №2. Архангельск, 2004.

5. Инжебейкин Ю.И. Гидродинамическое моделирование суммарных уровней и течений в Белом море при штормовых нагонах // Деп. во ВНИИГМИ-МЦД. 1987. № 697-ГМ, 27 с.
6. Инжебейкин Ю.И. Исследование взаимодействия между приливом и нагоном в Белом море // Деп. во ВНИИГМИ-МЦД. 1987. № 695-ГМ. 29 с.
7. Инжебейкин Ю.И., Лупачев Ю.В. О взаимодействии реки и моря в устьевых экосистемах Европейского Севера России / Литосфера и гидросфера Европейского Севера России. Екатеринбург, 2001. С. 259-298.
8. Инжебейкин Ю.И., Кравец А.Г. Разработать методы анализа и расчета суммарных уровней и выявить основные закономерности их формирования в Белом море. Деп. во ВНИТЦ. 1983. № 0183.0037212. 73 с.
9. Инжебейкин Ю.И. Численное моделирование штормовых нагонов в Белом море. // Сб. раб. Арх. Гидрометцентра, Вып. I. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 76-98.
10. Кравец А.Г., Инжебейкин Ю.И. Течения в Белом море // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Л.: Гидрометиздат, 1989-1992. Т II. Белое море. Вып. I. Гидрометеорологические условия. 1991. С. 123-130.
11. Инжебейкин Ю.И. - Однонаправленные движения в колебаниях уровня Белого моря // Колебания уровня в морях. С.-Пб.: РГГМУ, 2003. С.31-39.
12. Инжебейкин Ю.И. Численное исследование сейшевых колебаний уровня Белого моря // Там же, С.40-46.
13. Инжебейкин Ю.И. Особенности длиннопериодных колебаний уровня Белого моря // Там же, С.47-56.
14. Инжебейкин Ю.И., Полупанов В.Н. Провести исследования процессов водо-, соле- и теплообмена Онежской губы и Белого моря, дать прогноз их изменений при осуществлении варианта переброски части стока северных рек. Пространственно-временная изменчивость гидрологических характеристик Онежского залива и его водообмен с Бассейном. Деп. во ВНИТЦ, 1985. Регистр. № 01.85.0 013745. 66 с.
15. Инжебейкин Ю.И. О результатах расчета водообмена в Белом море. // Тез. докл. науч.-практ. конф. «Проблемы Белого моря, пути решения». Архангельск, 1981. С. 38-40.
16. Кравец А.Г., Инжебейкин Ю.И., Адериха П.Н., Лукин Л.Р., Полупанов В.Н., Цедерштрём С.А. Моделирование Белого моря как физической системы. Существующие проблемы. Там же, с. 32-37.
17. Инжебейкин Ю.И. О ледообмене в Двинском заливе Белого моря. Там же, с. 41-42.

18. Инжебейкин Ю.И. О сейшевых колебаниях уровня Белого моря // Сб. тр. VIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. С. 295.
19. Инжебейкин Ю.И., Лагутин Б.Л., Стибнева Л.А., Павлючук Ю.П. Уровень Белого моря / Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. т.5, Белое море. Л.: Гидрометеиздат, 1989.
20. Титов Ю.А. Инжебейкин Ю.И. Численное моделирование приливных движений в устье Онеги // Экология Северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: Тр. международн. конф. Архангельск, 2002. С. 819-822.
21. Инжебейкин Ю.И., Тарасова Н.А., Морева О.Ю. О пространственной неоднородности распределения некоторых компонентов экосистемы устьевой области р. Северная Двина // Там же, стр. 583-589.
22. Инжебейкин Ю.И. Формирование экстремальных уровней в Белом море: Дис. канд. геогр.наук. Гос. океаногр. ин-т. М., 1988.
23. Инжебейкин Ю.И. Экстремальные уровни в Белом море // Экологические проблемы Европейского Севера: Тр. II Международн. школы-семинара. Архангельск, 1992. С. 41-42.
24. Инжебейкин Ю.И. Длиннопериодные колебания уровня Белого моря. Там же, С. 42-44.
25. Инжебейкин Ю.И., Лупачев Ю.В. и др. Взаимодействие реки и моря в устьевых экосистемах окраинных морей Арктики (Белого, Баренцева) // Деп. во ВНИТЦ. 1995. № 02.980 000142. 198 с.
26. Инжебейкин Ю.И., Лупачев Ю.В. и др. Гидролого-гидродинамические и гидрохимические аспекты оценки и прогноза состояния экосистем устьев рек бассейнов Белого и Баренцева морей // Деп. во ВНИТЦ. 1995. № 01.9.30 008264. 149 с.
27. Инжебейкин Ю.И., Скибинский Л.Э. Особенности изменчивости гидрологических элементов Унской губы // Тр. Международн. конференция «С.Ф. Огородников и история Российского флота». Архангельск, 1995.
28. Инжебейкин Ю.И. Особенности динамики вод Горла Белого моря // Тез. докл. III Международная конференции «Поморье в Баренц-регионе: экология, экономика, социальные проблемы, культура». Архангельск, 1997.
29. Инжебейкин Ю.И., Козлов В.Д. Стратегия исследования взаимодействия реки и моря в устьевых экосистемах Баренцева региона // Экологические проблемы Европейского Севера России. Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 1996. С. 111-121.