



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ПО ЮНЕСКО– МОКи КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Бакалаврская работа)

На тему «Термохалинные процессы в прибрежной зоне».

Исполнитель Хектор Ромалдо Освальдо

Руководитель Доктор географических наук, доцент
Аверкиев Александр Сергеевич

Консультант: Татаренко Юрий Алексеевич
ассистент кафедры Океанологии РГГМУ
«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой 
кандидат географических наук,

Хаймина Ольга Владимировна

«19» мая 2023г.

Санкт-Петербург
2023г

Содержание

ВведениеЦель и задачи	2
Глава1. Физико-географическое описание акватории Обзор литературы по проливу БЗ	4
1.1. Физико-географическоеописание Финского залива и пролива Бьеркезунд.....	4
1.2. Историческая справка о месте проведения исследований.....	5
1.3. Климатологические условия в восточной части Финского залива.....	7
1.4. Гидрологический режим района исследования.	13
Глава 2. Исходные данные и методы работы.....	21
2.2. Данные наблюдений в проливе Бьеркезунд	26
2.3. Программный комплекс CARDINAL.....	28
Глава 3. Термохалинный режим пролива Бьеркезунд	33
Глава 4. Численные эксперименты с моделью пролива Бьеркезунд	43
Заключение	50
Использованныеисточники	52
Приложение	55

ВведениеЦель и задачи

Процессы в прибрежной зоне морей и заливов отличаются разнообразием форм проявления, которые являются результатом протекания этих процессов и механизмов, их вызывающих. Сложные процессы происходят, например, в проливах между островами, которые являются одним из типов прибрежных зон. В восточной части Финского залива расположены Березовые острова, отделенные от северного берега финского побережья проливом Бюрькезунд. Термохалинные процессы в этом проливе являются наглядным примером более общих процессов в прибрежной зоне. В течение нескольких десятилетий студенты-океанологи РГМУ практиковались и проводили океанологические исследования в этом проливе. Базы располагались как на островах, так и на берегу в городах Приморск, Выборг и окрестностях. Поэтому получение лучшего представления о таких акваториях, процессах, происходящих в них, представляет интерес не только для студентов и преподавателей РГМУ, но и для более широкого круга потребителей и исследователей: морских геологов, портовых строителей, судоводителей и других.

Целью данной работы является анализ термохалинных процессов в проливе Бьеркезунд, выяснение механизмов, которые их определяют, и воспроизведение некоторых процессов с помощью математического моделирования.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи.

I. Обобщить результаты наблюдений, проведенных в проливе Бюрькезунд за несколько лет и сравнить с данными других исследований по литературным источникам.

II. Рассмотреть термохалинные процессы, происходящие в проливе при различных погодных условиях, и механизмы которые их вызывают.

III. Использовать программный комплекс CARDINAL (ПК) для воспроизведения некоторых характерных процессов, и для понимания этих механизмов.

IV. Сравнить результаты моделирования с натурными данными.

V. Дать рекомендации по проведению полевых экспериментов в проливе Буркезунд во время предстоящих учебных практик.

Изучение таких акваторий, процессов и особенностей проводится достаточно давно, поскольку многие вопросы и задачи, которые необходимо было решить, имели важное практическое значение для морской деятельности. В настоящее время инструменты для решения этих запросов становятся доступными благодаря технологическому прогрессу и постоянно растущим вычислительным возможностям. Понимание особенностей процессов и механизмов, которые их вызывают, позволяет лучше управлять прибрежной деятельностью и оценивать воздействие человеческой деятельности на гидрологические режимы и профили характеристик не только в прибрежных зонах, но и в водах, не имеющих выхода к морю. Одним из таких инструментов, который становится надежной платформой для различных исследований, является математическое моделирование с использованием программного обеспечения, позволяющего производить визуализацию данных и результатов моделирования.

Глава1. Физико-географическое описание акватории Обзор литературы по проливу БЗ

1.1. Физико-географическое описание Финского залива и пролива Бьеркезунд



Рисунок 1.1. Северо-восточная часть Финского залива. О-ва Березовые, пролив Бьеркезунд.[1]

Финский залив является вторым по величине заливом Балтийского моря. Протяженность залива составляет в общей сложности около 400 км, ширина у входа на линии Писаспеа - Ханко достигает 70 км, по меридиану достигает 130 км, а к востоку (Шепелевский участок) сужается до 20 км. Общая площадь водного зеркала составляет 29 700 кв. км (7% от общей площади Балтийского моря). Объем водной массы - 1120 кубических км (5% водной массы Балтийского моря). Часть Финского залива, расположенная к востоку от о-ва. Гогланд, обычно называется восточной частью Финского залива, площадь водной поверхности которой составляет 12 500 квадратных км, объем водной массы - 276 куб. км. Максимальная глубина восточной

части Финского залива достигает 60-65 м в районе о. Гогланд. Береговая линия северного берега Финского залива сильно изрезана, здесь имеются глубоко врезающиеся в сушу заливы и бухты (фьорды и шхеры), группы островов разных размеров, проливы и устьевые участки рек. Восточную оконечность Финского залива представляет дельта реки Невы, которая обеспечивает значительный приток пресной воды в залив и в море в целом.

Пролив Бьеркезунд расположен в северо-восточной части Финского залива и является естественной водной преградой, отделяющей острова Большой Березовый, Северный Березовый и другие от материка. Береговая линия в этой части залива и в проливе довольно изрезана, и в районе города Приморска есть удобная большая бухта. Основные глубины в проливе лежат в пределах 20-метровой изобаты. Длина пролива составляет 15 миль, а ширина - от 2 до 4 миль. Пролив Бьеркезунд территориально относится к глубоководному району восточной части Финского залива. Глубины здесь достигают 22-23м, что обеспечивает навигацию достаточно крупных судов, в первую очередь танкеров.

1.2. Историческая справка о месте проведения исследований

Упоминание о проливе Бьеркезунд встречаются в письменных документах начала 18 века. В ноябре 1724 года недалеко от фарватера, к югу от входа в пролив Бьеркезунд, местные жители обнаружили затонувшее торговое судно, у которого поверх льда "была видна лишь небольшая часть большой мачты". Таков был отчет, приведенный в записной книжке и письмах, отправленных графом Апраксиным. Оказалось, что немецкое торговое судно "Архангел Рафаил" (Любек) вмерзло в лед и было раздавлено или затонуло в результате столкновения со льдом. При радиолокационном

картографировании дна пролива, специалисты Центра подводных исследований заинтересовались этим и несколькими случаями, найденными в Российском государственном архиве Военно-морского флота. Оказалось, что во времена Петра Великого корабль с названием то ли "Архангел Гавриил", то ли "Архангел Рафаил" был раздавлен льдами в наших водах. Благодаря материалам удалось установить предполагаемый район гибели, и в ходе поисковой операции у подножия северного склона берега Верккоматала были обнаружены останки деревянного судна. Корпус оказался местами вмят в грунт, а корма была частично разрушена. Раскопки объекта начались в 2014 году, и за три сезона было смыто более 8 метров внутреннего пространства корпуса в носовой части. Не было никаких внешних признаков, по которым можно было бы идентифицировать найденное судно. Поэтому был проведен радиоуглеродный анализ древесины, который показал предполагаемый интервал вырубки материала - с 1650 по 1680 год. Принимая во внимание время сушки древесины и время постройки и эксплуатации, это вполне мог быть «Архангел Рафаил», известный по немецким архивам, построенный в Любеке в 1693 году.

В ближней истории в Финском заливе близ Приморска проводились испытания подводной лодки "Садко", спроектированной и построенной Центральным конструкторским бюро морской техники "Рубин". Ходовые испытания аппарата проводились в проливе Бьеркезунд, где есть подходящий фарватер, а также бетонный причал, сохранившееся со времен войны. Корпус был спроектирован для работы на глубине до 50 м с оптимальной глубиной 40 м, а испытания давлением имитировались на глубине 60 м.

1.3. Климатологические условия в восточной части Финского залива.

В качестве важного момента необходимо отметить, что климатологические данные для исследуемого участка - пролива Бьеркезунд на самом деле касаются акватории восточной части Финского залива, побережья Финляндии и Российской части побережья залива. Акватория находится в непосредственной близости от прибрежного города Приморск, в Выборгском районе Ленинградской области Российской Федерации,

Учитывая, что города Выборг и Приморск являются наиболее близкими по фактической близости к исследуемому участку, было бы удобно, чтобы данные по ним были источником данных, используемых для описания климатологических условий, изучения статистических тенденций и климатических норм и учета при построении модели. Однако все результаты поиска метеорологических и климатических данных с сайта [2], приводили к данным с известного Международного аэропорта Лаппеенранты, или рекомендаций ссылаться на них. Поиск как непосредственно в Приморске, так и в Выборге показал, что идеальной метеорологической синоптической станцией была бы станция в Выборге, Российская Федерация, но информация после многочисленных поисков постоянно возвращала меня к станции и сайту Международного аэропорта Лаппеенранты. Поэтому, учитывая тот факт, что метеостанция аэропорта Лаппеенранта предоставляет надежные данные и находится относительно недалеко от района исследования, то при дальнейшем описании использовались данные именно этой станции с сайта [2].

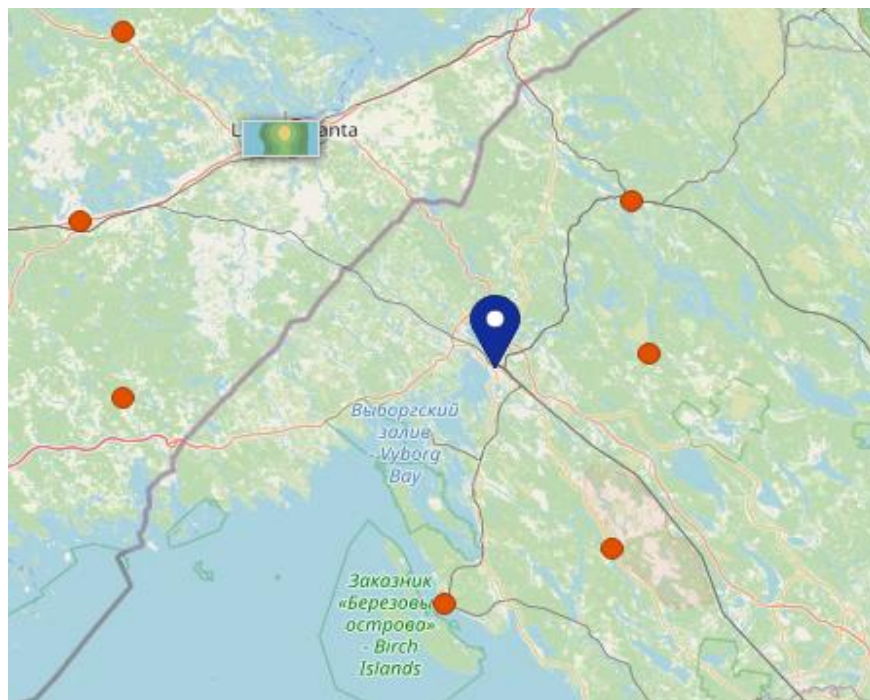


Рисунок 1.2 . Пространственное положение исследуемого района – пролив Бьеркезунд (А), предпочтительного пункта (сайта) для описания климатологии - Выборг (Б) и сайта с хорошей поддержкой и рекомендуемыми данными из источников информации (В) [9].

В качестве исходных данных для анализа конкретных условий и моделирования в исследовании использовались данные фактических наблюдений, выполненных сотрудниками и студентами РГГМУво время летней практики, а также данные из архивов [2] из международного аэропорта Лаппеенранты.

Ниже представлена нормальная климатологическая ситуация за 3-летний период для участка в Финском заливе, в районе пролива Бьеркезунд. Этот анализ охватывает период с 2018 по 2020 год. Параметры включают количество осадков, температуру, давление, скорость и направление ветра. Задача состоит в том, чтобы понять текущее состояние и таким образом создать основу для модели.

начинается примерно 1 октября и длится 6,5 месяцев, заканчиваясь примерно 17 апреля. Самый пасмурный месяц в году в аэропорту Лаппеенранты - январь, в течение которого небо в среднем пасмурно или преимущественно облачно 81% времени.

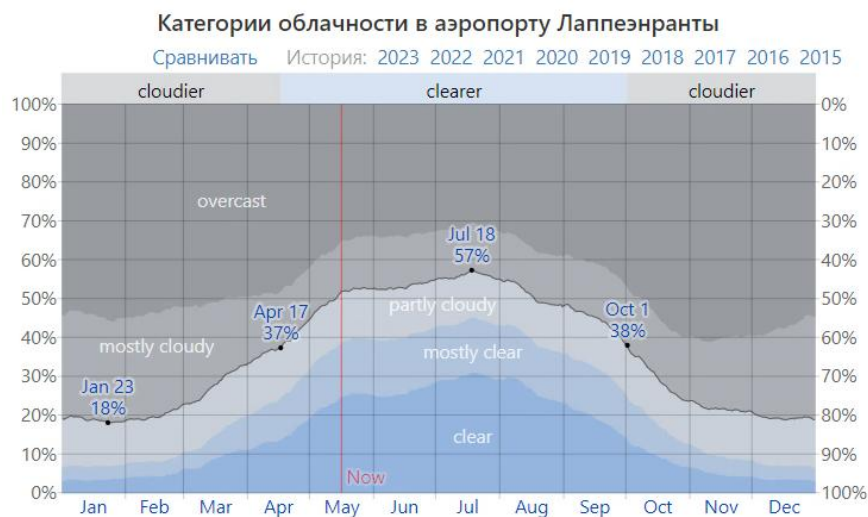


Рисунок 1.4. Сезонный ход облачности в % покрытия облаками неба
Показаны данные, собранные в аэропорту за 4 года [9].

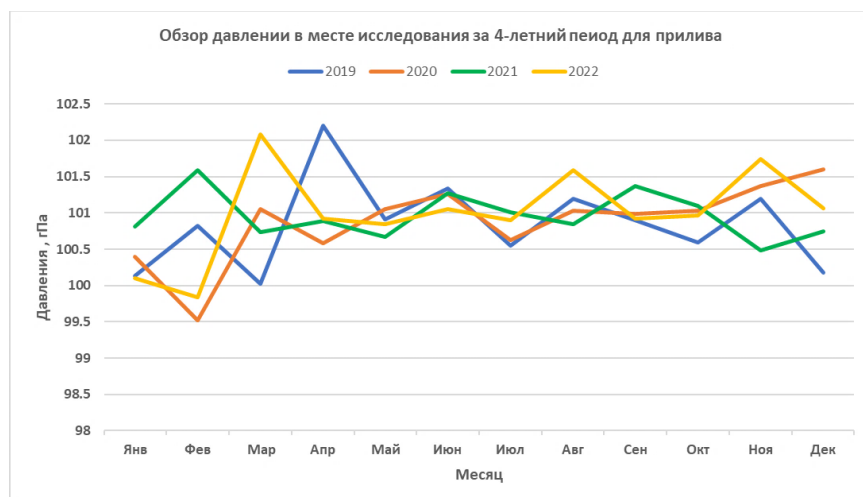


Рисунок 1.5. Сезонный ход давления над исследуемым районом осредненный за 4 года [10].

Влажность воздуха и осадки

За дождливый день для данного места считается день, когда выпало не менее 1 мм (0,04 дюйма) жидких или эквивалентных жидким осадков. Вероятность дождливых дней в качестве показателя меняется в течение всего года. Сезон дождей продолжался 7,2 месяца, с 28 мая по 3 января, с вероятностью того, что этот день будет дождливым, более 26%. Месяцем с самыми дождливыми днями в аэропорту Лаппеенранты является июль, в среднем за 10,3 дня выпадает не менее 1 мм (0,04 дюйма) осадков. Сухой сезон длится 4,8 месяца, с 3 января по 28 мая. Месяцем с наименьшим количеством дождливых дней по данным в аэропорту Лаппеенранты является февраль, в среднем за 5,2 дня выпадает не менее 1 мм (0,04 дюйма) осадков.

Одни только дожди случаются чаще всего в течение 8,6 месяцев, с 18 марта по 5 декабря. Месяцем с самыми дождливыми днями только в аэропорту Лаппеенранты является июль, в среднем 10,3 дня. Один только снег выпадает чаще всего в течение 3,4 месяцев, с 5 декабря по 18 марта. Месяцем с наибольшим количеством снежных дней только в аэропорту Лаппеенранты является январь, в среднем 4,4 дня.

Месяцем с наибольшим количеством осадков в аэропорту Лаппеенранты является июль, в среднем выпадает 68,58 мм осадков. Период без осадков в году длится 3,0 месяца, с 20 декабря по 20 марта. Месяцем с наименьшим количеством осадков в аэропорту Лаппеенранты является февраль, в среднем выпадает 5,1 мм осадков.



Рисунок 1.6. Годовой ход осадков [9].

Обзор ветра

Данные о среднечасовом векторе ветра над районом в зависимости от “скорости и направления” были получены с использованием данных метеорологической станции в аэропорту. Сбор данных для каждого из наблюдений проводился на высоте 2 метров над землей. В целом, данные показали умеренные сезонные колебания, как и следовало ожидать в течение всего года. Самыми ветренными оказались периоды, длившиеся 8,8 месяцев, с 11 сентября по 5 июня, со средней скоростью ветра более 3,3 м/с. Самым ветреным месяцем в году в аэропорту Лаппеенранты является апрель, со средней почасовой скоростью ветра 3,308 м/с. Период затишья в течение года продолжался 3,2 месяца, с 5 июня по 11 сентября. Самым маловетренным месяцем в году в аэропорту Лаппеенранты является июль, когда средняя почасовая скорость ветра составляет 2,9 м/с.

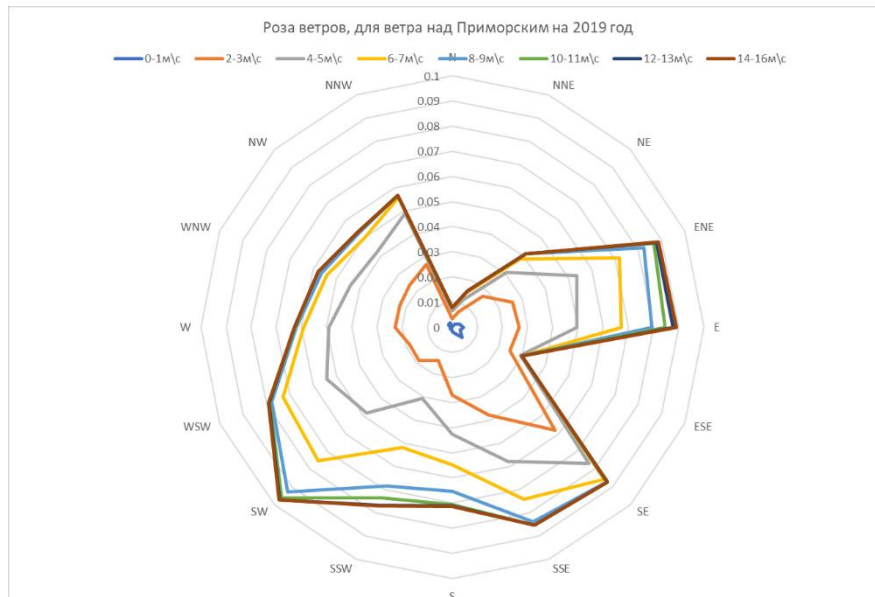


Рисунок 1.7. Роза ветров, показывающая скорость и направление ветра над Приморском на 2019 год [10].

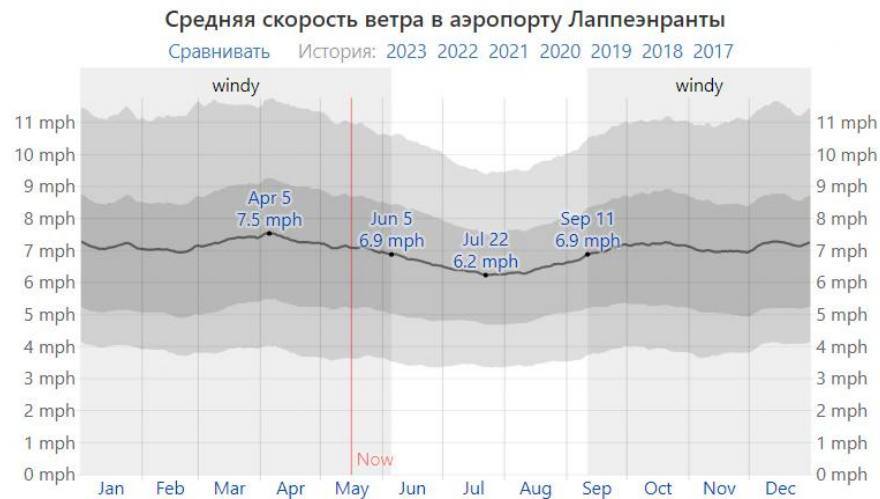


Рисунок 1.8.Сезонный ход средней скорости ветра [9].

1.4. Гидрологический режим района исследования.

Нижеследующее более конкретно относится к поверхностному и подповерхностному гидрологическому режиму исследуемого участка, таким образом, к специфическим характеристикам исследуемого района в

Финском заливе. Пролив Брекезунд расположен в Финском заливе Балтийского моря между материком и Березовыми островами, то есть, будет классифицирован как прибрежный гидрологический объект. Пролив является небольшой акваторией, поэтому логично рассмотреть распределение гидрологических характеристик в целом в Восточной части Финского залива и в самом проливе.

Температура воды.

Низкие температуры воды наблюдаются в Восточной части Финского залива (ВЧФЗ) с ноября по апрель, это время в большинстве лет эта часть залива покрыта льдом. Среднемесячная температура воды соответственно составляет от 0 до 2-3°C и близка к температуре замерзания или несколько выше в свободных ото льда акваториях. В апреле - мае после освобождения ото льда начинается прогревание верхнего слоя. В мае среднемесячная температура составляет около 7°C в открытой части и 8-9°C в заливах и у берега. Наиболее теплый месяц – июль, когда среднемесячная температура достигает 19-19,5°C, в августе наблюдаются температура 17-18°C, затем в сентябре начинается понижение поверхностной температуры вплоть до замерзания в среднем конце ноября-декабре.

В открытых районах ВЧФЗ, где глубина достигает более 70 м наблюдается двухслойная структура. Температура воды на горизонте 30м изменяется от 0,2-0,5°C в феврале-марте до 7-8°C в сентябре, максимум температуры сдвинут к осени. Причем в холодные зимы осенне-зимняя конвекция приводит к перемешиванию слоя воды до глубины 30-40м. Мелководные районы Невской губы зимой перемешаны до дна. В самых глубоких районах ВЧФЗ сезонный ход почти не выражен, температура изменяется от 2 до 4-5 °C, т.е перемешивание по вертикали не достигает дна

и термический режим определяется горизонтальными придонными движениями [3, 4].

Распределение температуры собственно в проливе БЗ на поверхности изменяется в пределах от 0°C до 18-20°C . Максимальные значения температуры в 20 °C наблюдаются в юго-восточной части пролива. Можно отметить 2 области с понижением температуры до 15 °C в центральной и юго-восточной частях. В других областях пролива температура не выходит за пределы 18,5-19 °C [5]. В это же время на глубине около 10 м летом наблюдаются большие изменения - слой скачка температуры. Температура понижается до 4-5 °C. В октябре –ноябре перемешивание достигает глубины около 29 м и нивелирует термоклина [6,7].

Солёность

При движении с востока на запад, по мере уменьшения влияния речного стока, солёность воды в Финском заливе увеличивается. Пресная вода распространяется в западном направлении по поверхности залива. Напротив, солоноватые воды в форме клина движутся на глубине в восточном направлении. Солёность воды на поверхности с востока на запад колеблется от 0,2 до 5,8‰, на дне - от 0,3 до 8,5‰[5,7].

В проливе Бьеркезунд, на участке, где проводились наблюдения, было обнаружено, что распределение солёности на горизонте 0 м колеблется от 1 до 4 ‰, в то же время на горизонте 10 м – солёность в основном составляет 3-4‰, а на глубине более 15м достигает 5‰.

Плотность

Плотность зависит как от температуры, так и от солёности. Летом температура в большей степени определяет плотность поверхностного слоя

воды. Однако влияние солености сильнее в слое воды с однородной температурой. Хотя давление воды также влияет на ее плотность в океанских глубинах, в относительно мелководном Балтийском море и Бьеркезундском проливе оно оказывает незначительное влияние на плотность. Балтийское море и Финский залив относятся к «солончатым» бассейнам (солончатые воды это воды с соленостью менее 24‰) , соленость глубоководных бассейнов Балтийского моря составляет около 12‰. Следовательно, температура наибольшей плотности составляет в открытой части моря около 1,5 °C. Вода в ВЧФЗ и, более конкретно, в Бьеркезундском проливе, имеет наибольшую плотность при температуре 2-3°C. Поскольку соленость увеличивается от поверхности ко дну и более соленая вода имеет большую плотность, то это обеспечивает устойчивую стратификацию в большей части Финского залива и в проливе БЗ.

Течения

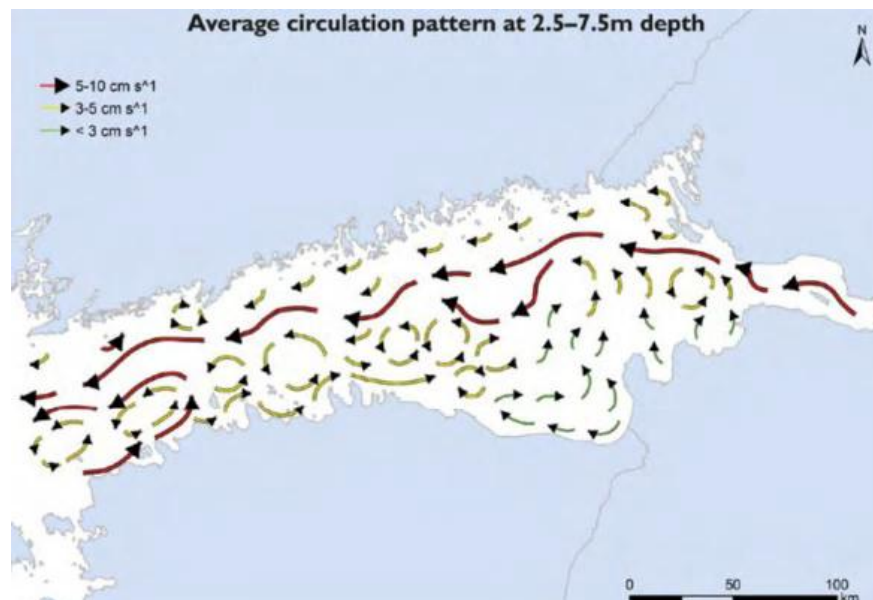


Рисунок 1.9 . Средняя многолетняя циркуляция в поверхностном слое в Финском заливе. Стрелки указывают направление, цветом указана скорость (см/с). [8 Владимирова О.М.Диссертация 2019]

Гидродинамические условия Финского залива определяются атмосферными процессами над акваторией, водообменом с Балтийским морем, речным стоком (главным образом р.Нева) и морфометрическими особенностями залива. Эти процессы являются основными факторами, определяющими течения и характер циркуляции вод залива (рис. 1.9). Это общепринятая схема циркуляции вод Финского залива, построенная в 1969 году[8 Владимирова О.М. Диссертация 2019]. Как видно из рисунка 10, общая циркуляция носит циклонический характер, так воды Балтийского моря проникают в залив с восточным течением вдоль южного берега и, смешиваясь в мелководной восточной части со стоком реки Невы, текут вдоль северного побережья.

Воды, образующиеся в центральной части циркуляции, нестабильны во времени, и, в зависимости от ветра, течения либо ослабевают, пока не исчезнут, либо усиливаются. При ветрах северного и северо-восточного, восточного и юго-восточного направлений в заливе сохраняется система стоковых течений. Наибольшие скорости течений наблюдаются в проливах между материком и островами. При ветрах южных направлений схема поверхностных течений в заливе представляет собой сложную картину, состоящую из ряда больших и малых циркуляций. Отток из Невской губы, проходящий вдоль южного побережья, прослеживается слабо. Вдоль северного побережья отток прослеживается вдоль всего залива в виде узкой полосы. При ветрах западного и юго-западного направлений возникают встречные поверхностные течения, которые ослабляют потоки сточных вод,

и способствуют нагонным явлениям, отток можно проследить только под северным берегом залива. При сильных юго-западных и западных ветрах почти по всей площади залива наблюдается течение на восток со скоростью, достигающей 25 см/с.

Глубина

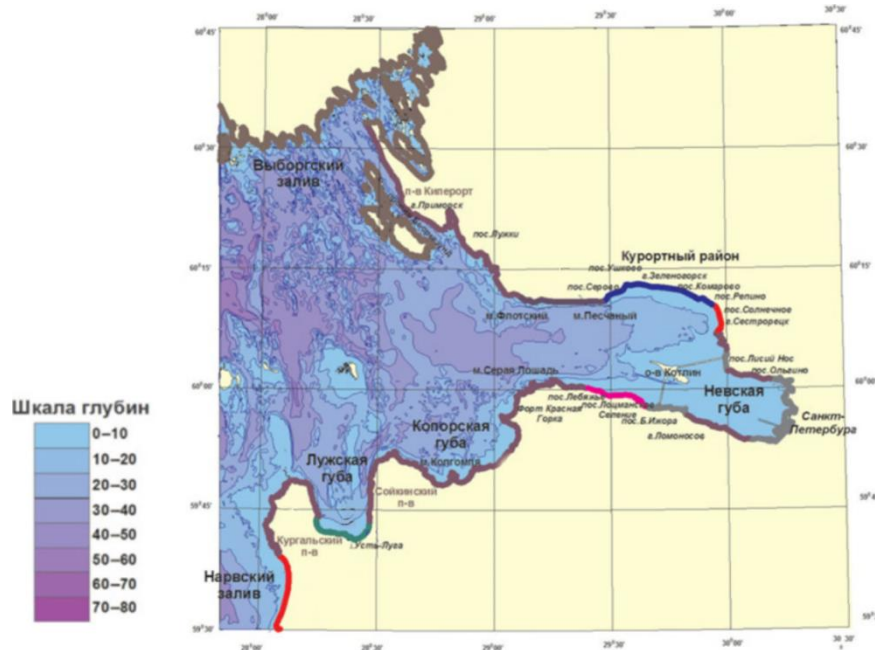


Рисунок 1.10. Показан более подробный профиль глубины водной территории Финского залива и Невской губы [11].

Финский залив представляет собой вытянутую впадину со средней глубиной 37 м, площадь поверхности залива составляет 29 571 км в квадрате, а максимальные значения достигают около 115 м в его западной части, что обеспечивает вертикальную стратификацию как по T, так и по S. Пресная вода поступает в залив с востока, принимая во внимание, что соль в основном транспортируется по глубоководным участкам моря с юго-запада. Из-за его вытянутой формы апвеллинг может происходить вдоль обоих

побережий; западные ветры вызывают апвеллинг вдоль финского побережья, а восточные ветры вдоль относительно прямого побережья Северной Эстонии протяженностью 350 км. Более того, подъем на одном побережье обычно сопровождается спадом на противоположном побережье. Однако вероятность апвеллинга, как ожидается, несколько выше на северном побережье, достигая примерно 20-25%. Тем не менее, проявления апвеллинга вдоль эстонского побережья кажутся более заметными, чем на финской стороне – вероятно, из-за разного уклона противоположных берегов залива и разного климатологического фона западных и восточных направлений.

Ледовый режим

Ледовый режим Финского залива определяется его географическим положением, климатическими условиями, глубиной, интенсивностью обмена с Балтийским морем и сильным опреснением залива под влиянием речного стока. Устойчивый ледяной покров образуется почти каждую зиму, однако ледовые условия очень разнообразны. Так, в суровые и умеренно суровые зимы ледяной покров занимает всю площадь залива, а в мягкие зимы лед наблюдается только в восточной части и прибрежных зонах залива [12]. По данным атласа и по классификации зим можно констатировать, что в проливе Бьюркезунд ледовый покров наблюдается во все зимы. Но в суровые зимы толщина и твердость льда большие, а в мягкие – толщина меньше, и только припайный лед – плотный и твердый.



Рисунок 1.11.Толщина ледового покрова в зимние периоды за 21 год, с 1996 по 2017 год, в Финском заливе [12,13].

Согласно литературе, предоставленной сайтами, а также анализу карт, можно констатировать следующее ;

- I. Структура термохалинных полей в Финском заливе в незамерзающий период весьма разнообразна и формируется под влиянием как долгопериодических, так и короткопериодических процессов.
- II. А вблизи береговой линии в проливах топографические эффекты играют очень важную роль, образуя вихри, апвеллинги и каскады, определяющие формирование ячеистой термохалинной структуры с высокими градиентами температуры и солености.

Глава 2. Исходные данные и методы работы.

2.1. Приборы и оборудование, применявшиеся для наблюдений.

Для рассмотрения и анализа термохалинного режима пролива БЗ были использованы результаты исследований, представленных в литературе [Лукиянов 2003, Иванов 2003, Аверкиев 2022, Иванов 2022] и данные наблюдений выполненных в проливе во время летних практик студентов РГГМУ, в том числе с участием авиора.

Для возможности дальнейшего анализа термохалинных процессов рассмотрим сначала имеющийся набор данных наблюдений, полученных во время летних практик, приборы, которые были использованы и методики обработки данных наблюдений. После задания координат береговой черты, рельефа дна и граничных условий на поверхности и на жидких границах становится возможным приступить к процессу моделирования распределения гидрологических характеристик в исследуемом бассейне. Учитывая всю представленную информацию, целью на этом этапе было составить представление о том, что происходит на месте, и создать базу данных, основанную на собственных фактических данных, а не на данных источников, которые предлагали некоторые данные в виде средних значений.

Обращаем внимание на период с 18 по 26 июня 2021 года, когда автор сам принимал участие в выполнении работ во время летней учебной практики и на место, близ береговой линии проведения исследования. Студенты РГГМУ размещались в помещении по адресу: ул. Заводская, 6, Приморск, Ленинградская обл., 188910, там же находились лаборатория, хранилище для оборудования и т.д. Что еще более важно, это место было местом стоянки двух судов «Мальва» и «Баллада», оборудованными для проведения исследований. Для проведения и завершения процесса сбора

данных был заранее составлен контрольный список, а также проведено тестирование оборудования и услуг.

Параметрыоборудования:

Для запланированных мероприятий, которые были запланированы на объекте, был выбран следующий набор оборудования. Состав оборудования был сформирован с расчетом, что наблюдения будут многогранными и охватывать широкий спектр данных, например, гидрохимические параметры, а также фактические метеорологические и гидрологические данные.

Были использованы следующие приборы и инструменты.

1. SBE-19, зонд использовался для сбора значений солености/электропроводности, температуры и давления.
2. ВЕКТОР, для измерения скорости и направления течений, измерения гидростатического давления и температуры воды.
3. БАТОМЕТРЫ НИСКИНА для сбора проб воды.
4. БАРОМЕТР-АЭРОИД, для измерения атмосферного давления.
5. ПСИХРОМЕТР, прибор для измерения влажности и температуры воздуха.
6. АНЕМОМЕТР РУЧНОЙ, прибор, используемый для измерения скорости ветра в зависимости от скорости вращения флюгарки.
7. PH-МЕТР, прибор определения величины кислотности или щелочности в пробе морской воды.
8. ДИСК СЕККИ (белый диск), для определения прозрачности воды в зависимости от глубины видимости диска.
9. ЭХОЛОТ, прибор для определения глубины места. Это были приборы, которые в основном использовались для наблюдений.

Стандартные ежедневные рабочие процедуры:

После того, как инструменты для задач наблюдения были доставлены, проверены и протестированы, была проведена следующая процедура установки ежедневного режима наблюдений для оптимизации времени и получения наилучшего результата. Общая разбивка работ была установлена для (А) дневных и ночных наблюдений и (Б) метрологических и гидрологических наблюдений, и они проводятся следующим образом:

Дневные и ночные наблюдения:

Для получения полного набора данных о погодных явлениях и их взаимодействии с водным объектом в этом районе проводились наблюдения как утром, так и вечером командой, проводящей ежечасные наблюдения в течение периода после проведения гидрологических наблюдений. Сюда входят такие наблюдения, как проверка количества осадков, скорости и направления ветра, облачного покрова, содержания влаги, атмосферного давления и температуры.

В течение дня, когда экспедиция приступала к выполнению своих задач, начиная с метеорологических, а затем и гидрологических, включая проверку облачного покрова, содержания влаги, температуры атмосферы, давления, скорости и направления ветра. Метеорологические наблюдения включают в себя также наблюдения, за высотой и длиной волн, а гидрологические наблюдения включают измерение температуры воды на поверхности и на нескольких глубинах, прозрачности воды, а также измерение направления и скорости течения.

Стандартные операционные процедуры или СОП в общем смысле должны быть выполнены, затем следует развертывание глубоководного оборудования, такого как SBE-19 и VEKTOR. Как правило, это обычно

делается в порту базы в качестве простой проверки и обслуживания. Затем команды разделяются на разные судна для наблюдений на назначенных станциях по запланированному курсу и станциях, указанных в соответствии с нанесенными на карту для максимального использования времени и экономии топлива. Также выбирается наиболее оптимальный маршрут для получения необходимого набора проб воды, насколько это возможно.

Сбор данных:

Важно точно соблюдать правила сбора и хранения данных, это имеет первостепенное значение, и поэтому система сбора и хранения данных была следующей.

Что касается фиксации и письменного копирования при сборе данных, то это делается экипажем и наблюдателем и передается помощнику наблюдателя для создания копий для защиты в случае повреждения таблицы данных, а также для уменьшения человеческих ошибок. Данные записываются карандашом и при закрытии рабочего дня помечаются ручкой как отмеченные. Все члены экипажа обязаны знать координаты каждой остановки и каждой станции, а также в технических паспортах должны быть соответствующие метаданные с указанием даты и времени для объектов.

В самый первый день карты и разъемы памяти, такие как USB и встроенное хранилище для всего оборудования, были проверены и переустановлены, чтобы обеспечить необходимое пространство и убедиться в отсутствии повреждений. Когда все проверки завершены и память и оборудование одобрены для эксплуатации, накануне вечером загружается новая память, а данные удаляются после каждой экспедиции.

Сортировка данных:

Задача по сортировке данных включала в себя обрезку остаточных данных, которые не нужны, а также преобразование единиц измерения для корректных последующих вычислений. Причина выполнения этой процедуры после каждого рабочего дня заключается в сокращении возможных ошибок в дальнейшем, поскольку выполнение этого в массовом порядке приводит к увеличению вероятности ошибки в вычислениях. Процесс сортировки данных выполняется после выполнения всего набора действий.

Прежде чем вернуться обратно в лабораторию или покинуть место наблюдения, данные должны быть хорошо помечены, в том числе: какой экипаж, какое судно, дата и время дублирования, а также какое конкретное оборудование использовалось в качестве надлежащего источника данных.

Контроль качества данных:

Упомянутый выше процесс сортировки данных в значительной степени снижает уровень ошибок, а в большинстве случаев и вовсе их не допускает, и снижает вероятность любых форм путаницы в основном наборе данных во время вычислений. Более того, процесс контроля качества данных используется с целью выявления выбросов или любых аномалий, которые представляют собой несоответствие или относятся к подлинным данным или важному явлению, и сохранения их для последующих вычислений и сохранения интересного события, которое могло произойти.

Преобразование данных:

Процесс преобразования данных непосредственно с оборудования очень важен, так как позволяет убедиться, что данные гораздо удобны в

использовании для дальнейших вычислений или задач. Также это помогает уменьшить количество ошибок, а также подтверждает факт, что инструменты проверены. Так, при неправильном преобразовании данных это может указывать на проблему с оборудованием, с которого были получены данные. Тогда может потребоваться калибровка прибора, исправление и получение более качественных данных, предотвращающих использование неправильных данных для расчетов. Что еще более важно, данные в данном случае были преобразованы из Excel или других более старых форматов в формат text или .TXT, что подготовило их к вводу в программный комплекс CARDINAL soft.

2.2. Данные наблюдений в проливе Бьеркезунд

(по результатам летних практических занятий 2021 года)

Данные, использованные для исследования, были получены во время летней практики 2021 года по океанологии, группа ПО-Б19-2-5, сюда входят данные SBE-19, VEKTORB, mailu для изучения профиля вертикального распределения вод в Приморске по широкой выборке с северо-запада пролива Бьеркезунд на юго-востоке также с восемью точками данных поперечного сечения (среднее значение поперечных сечений - пять). Наблюдения проводились с поверхности и до глубины 30 метров. Параметры включали: температуру, соленость, направление и скорость течения. Примеры более полных наборов данных представлены в Приложении

Таблица 2.1. Пример набора данных по температуре воды на станции 2.1, один из большого числа наборов

№, Ст	Дата меся ц	Врем ячас: мин	h	Тем воды °C на h
2.1	12.06	14:54	0	18.8
2.1	12.06	14:40	16.2	7.9
2.2	12.06	16:08	0	18.9
2.2	12.06	16:29	10	9.4
2.2	12.06	16:20	15	6.3
2.3	12.06	17:26	0	18.4
2.3	12.06	17:07	15	6.5

Далее показаны графические представления данных наблюдений. Графики разрезов генерируются с помощью пакетов Ocean Data View или ODV. На рис 2.1.показано распределение температуры на разрезе 5(поперек основного течения в средней части пролива Бьеркезунд), а также положение разреза на карте пролива и профили вертикального распределения давления, и температуры (совмещены профили всех станций разреза) в июне 2021г.

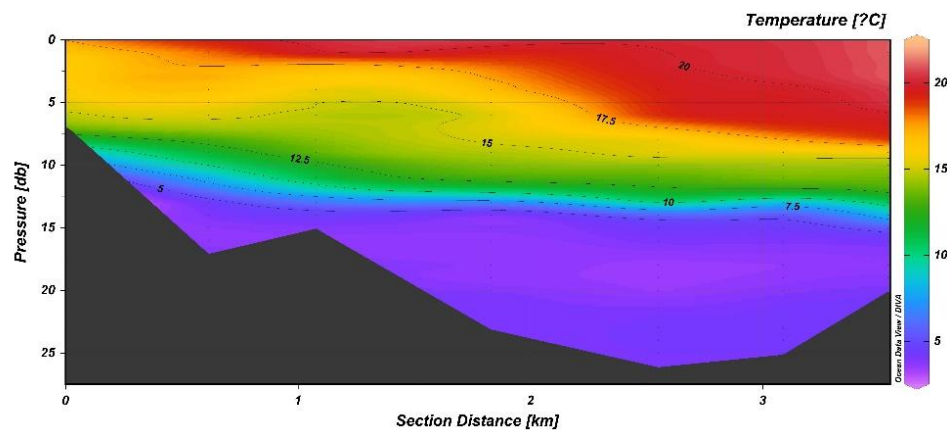


Рисунок 2.1.Распределение температуры на разрезе 5, положение разреза на карте пролива и профили вертикального распределения давления, и температуры (совмещены профили всех станций разреза)

На рис. 2.2 и 2.3. представлено распределение солёности и давления на разрезе 5 в июне 2021г.

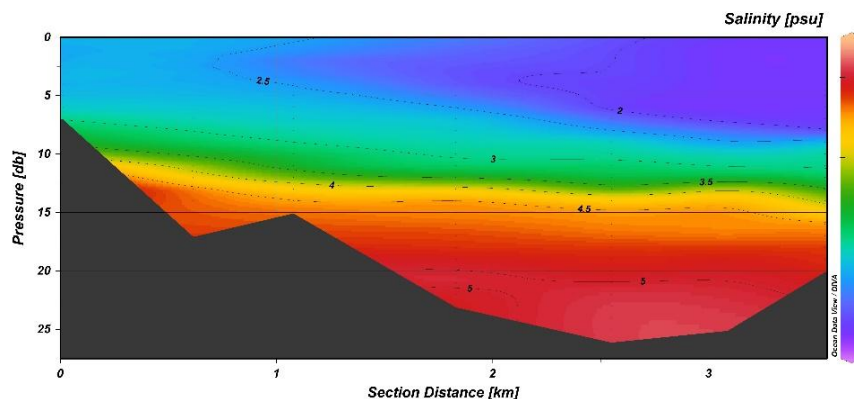


Рисунок 2.2. Распределение солёности на разрезе 5, июнь 2021г.

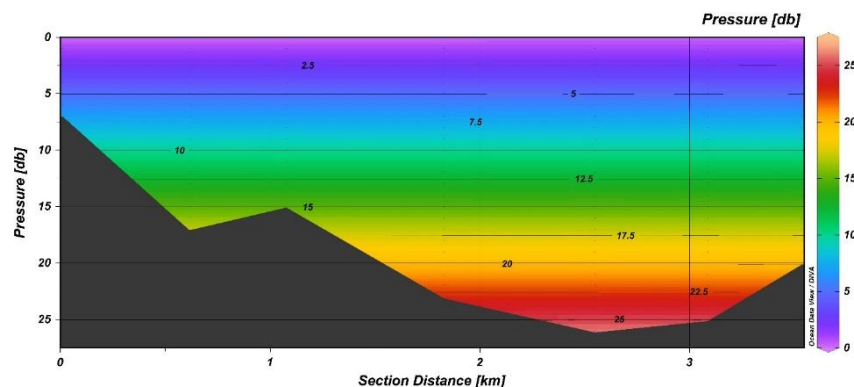


Рисунок 2.3. Распределение давления на разрезе 5, июнь 2021г.

2.3. Программный комплекс CARDINAL.

CARDINAL – это программный комплекс (ПК), который позволяет создавать математические модели различных водных объектов и моделировать нестационарные гидродинамические процессы, распространение растворенных и взвешенных загрязняющих веществ, температуру, солёность и транспорт донных наносов[14]. CARDINAL имеет развитый пользовательский интерфейс. Название образовано от слов Coastal

Area Dynamic Investigation Algorithm. ПК CARDINAL предназначен для расчетов стоковых, ветровых, приливных, плотностных и других типов течений и колебаний уровня. Объектами исследований могут быть озера, водохранилища, реки, эстуарии, заливы, моря. Расчеты выполняются как в двумерной (плановой), так в трехмерной постановках. В программе используется переход к криволинейным гранично-зависимым координатам. Использование метода криволинейных координат позволяет достичь высокого разрешения сетки в наиболее важных частях расчетной области и получать более точные решения. Уравнение распространения загрязняющих веществ решается неявным консервативным конечно-разностным методом направленных разностей третьего + первого порядков точности. Данный метод решения не приводит к численной диффузии и позволяет исключить численные осцилляции решения[14].

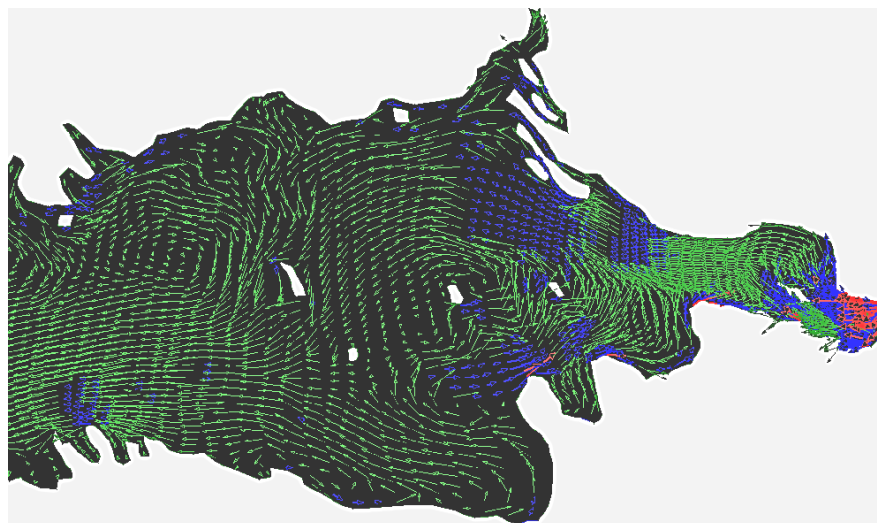


Рисунок 2.4. Пример расчета поля скорости в восточной части Финского залива

Уравнения, используемы в ПК CARDINAL

Исходная система гидродинамических уравнений, используемая для решения задач в численных моделях, приведена ниже. При решении используется переход к криволинейным гранично-зависимым координатам, что позволяет повысить точность решения задач в областях сложной формы и с резкими изменениями рельефа дна. Возможна осушка и заливание ячеек расчетной сетки. В трехмерной постановке уравнения решаются в приближении гидростатики. В систему входят следующие уравнения: для скорости течения (u, v, w) , уровня воды (ζ) , температуры T ($^{\circ}\text{K}$), солёности воды (S) , концентраций примесей (c) и нефтепродуктов (cH) .

Например, уравнение движения для компоненты u имеет вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_o} \int_z^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P_a}{\partial x} + f_c v + K \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Где:

g - ускорение свободного падения,

$\rho(T, S)$ - плотность воды, определяемая по ее температуре T и солёности S по зависимости UNESCO:

$$\rho_o = 1000 - 0.157406 + T * \{ 6.793952 \cdot 10^{-2} - T * [9.095290 \cdot 10^{-3} - T * (1.001685 \cdot 10^{-4} - T * (1.120083 \cdot 10^{-6} - T * 6.536332 \cdot 10^{-9}))] \} + S * \{ 8.24493 \cdot 10^{-1} - T * [4.0899 \cdot 10^{-3} - T * (7.6438 \cdot 10^{-5} - T * (8.2467 \cdot 10^{-7} - T * 5.3875 \cdot 10^{-9}))] - S \cdot 1 * [5.72466 \cdot 10^{-3} - T * (1.0227 \cdot 10^{-4} - T * 1.6546 \cdot 10^{-6})] + S * 4.8314 \cdot 10^{-4} \};$$

ρ_o — среднее значение плотности воды,

P_a - атмосферное давление,

$f_c = 2 * \omega * \sin * \varphi$ - параметр Кориолиса,

φ - географическая широта,

ω - угловая скорость вращения Земли,

K – коэффициент горизонтального турбулентного обмена,

ν_T - коэффициент вертикального турбулентного обмена,

Координата z направлена вертикально вверх.

Граничные условия. Придонное трение и касательное напряжение ветра

На дне при $Z = -h(x,y)$ задается касательное напряжение трения с помощью квадратичного закона

$$\begin{aligned}\tau_{b(x)} &\equiv \rho_o \nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=-h} = -\rho_o f_b u |\nabla| \\ \tau_{b(y)} &\equiv \rho_o \nu_T \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=-h} = -\rho_o f_b v |\nabla|,\end{aligned}\tag{2}.$$

Где f_b - коэффициент придонного трения.

На поверхности касательное напряжение трения также задается с помощью квадратичного закона

$$\begin{aligned}\tau_{s(x)} &\equiv \rho_o \nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} = \rho_a C_D W_x |\mathbf{W}| \\ \tau_{s(y)} &\equiv \rho_o \nu_T \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} = \rho_a C_D W_y |\mathbf{W}|,\end{aligned}\tag{3}.$$

Где C_D - коэффициент ветрового трения,

$\mathbf{W} = (W_x, W_y)$ - скорость ветра на высоте 10 м,

ρ_a – плотность воздуха (1.225 кг/м³).

Для определения C_D по умолчанию используется формула Банке и Смита:

$$C_D (0.63 + 0.066|\mathbf{W}|) 10^{-3}.$$

Область

Окно «Область» служит для создания границы расчетной области и построения расчетной сетки - это наиболее сложный и важный этап в создании модели. Граница расчетной области состоит из отрезков ломаной линии. В простейшем случае границей является замкнутый односвязный контур. Расчетная область может быть многосвязной и содержать произвольное количество островов и особых областей, ограниченных дамбой.

Выбор метрической системы

При создании границы сначала надо указать размер расчетной области в метрах в окне **Контур/Параметры**. Координаты точек границы хранятся в программе в метрах. Нуль координат при начале работы расположен в левом нижнем углу экрана. Горизонтальная ось X направлена на восток, вертикальная ось Y – на север.

Прямоугольная сетка

В программе имеется также возможность создать прямоугольную расчетную сетку (без создания предварительно контура расчетной области). Это может быть сделано, используя подложку или поле глубин. Этот метод не позволяет задавать дамбы. При использовании подложки надо выбрать в меню пункт **Прямоугольная сетка/Использовать подложку**. Он доступен, если есть подложка (Раздел **Сервис/Подложка**) и кнопка нажата. Подложка должна иметь одинаковый цвет всей водной области. Область с сушей может быть окрашена в различные цвета, но она не должна содержать цвет, отображающий воду. В появившемся окне надо задать шаг сетки или число точек вдоль наиболее длинного размера области. Затем появится при-

глашение щелкнуть мышью в любом месте водного пространства, чтобы указать цвет, соответствующий водным ячейкам. После этого прямоугольная сетка будет построена.

Меню **Прямоугольная сетка/Использовать глубины** доступно, если загружен массив глубин в свободных точках (раздел **Глубины**). Здесь также надо задать шаг сетки или число точек вдоль наиболее длинного размера области. Кроме того, надо задать глубину, соответствующую берегам расчетной области (поле **Отметка уреза**). При построении расчетной сетки ищется ближайшая к данному узлу точка с глубинами. Если глубина в ней меньше заданной, данная ячейка сетки принимается относящейся к незаплавленной суше, и наоборот (положительное направление глубин – вниз).

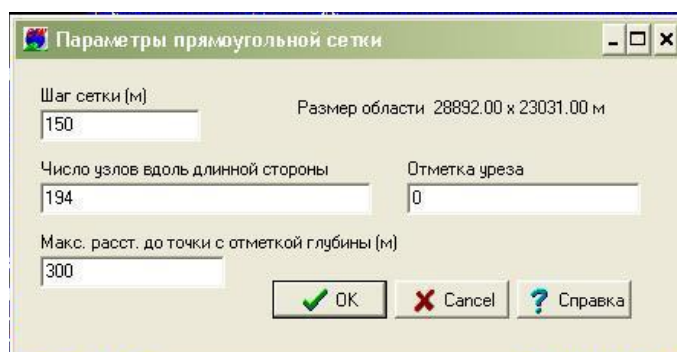


Рисунок 2.5. Пример задание параметров для построения активной сетки на полигоне.

Глава 3. Термохалинный режим пролива Бьеркезунд

Пролив Бьеркезунд - типичный объект прибрежной зоны Финского залива. Его характерными морфологическими чертами являются значительные перепады глубины от 0 до 30м, связанные с тем, что дно и берега в основном сложены скальными породами, и относительно небольшая ширина (2-3,5 км) по сравнению с длиной, составляющей около 30 км.

Пролив вытянут с северо-запада на юго-восток. Береговая линия значительно изрезана.

Термохалинная структура вод пролива определяется термическим и динамическим воздействием атмосферы и теплообменом и водообменом с прилегающей акваторией Восточной части Финского залива, а также указанными морфометрическими чертами. Атмосферное влияние заключается в теплообмене и воздействии ветра, и соответственно, имеет хорошо выраженные сезонный и суточный ход. Водообмен с ВЧФЗ через открытые северную и южную границы также подвержен сезонной и суточной изменчивости, так как связан в первую очередь с ветровым режимом. Поэтому в частности при выполнении гидрологических работ в акватории пролива значительное внимание уделялось точности и регулярности производства метеорологических наблюдений. Большая часть гидрологических данных, которые здесь анализируются, получены в южной части пролива БЗ, основная схема расположения станций приведена на рис. 1

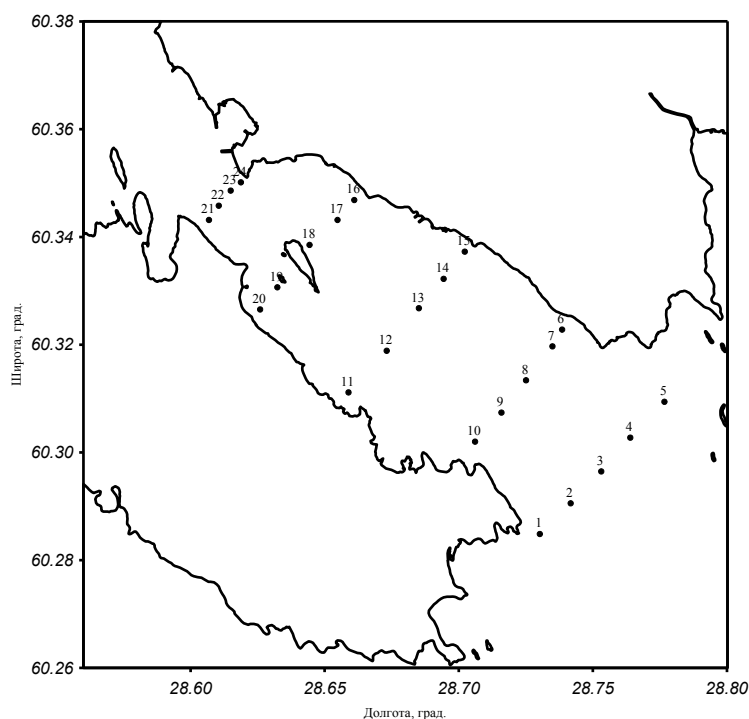
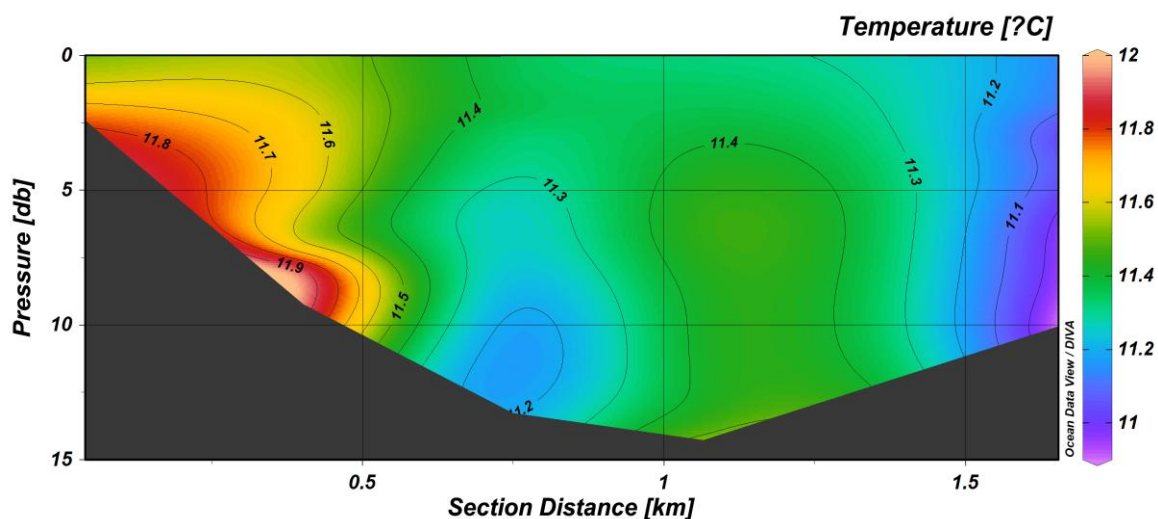
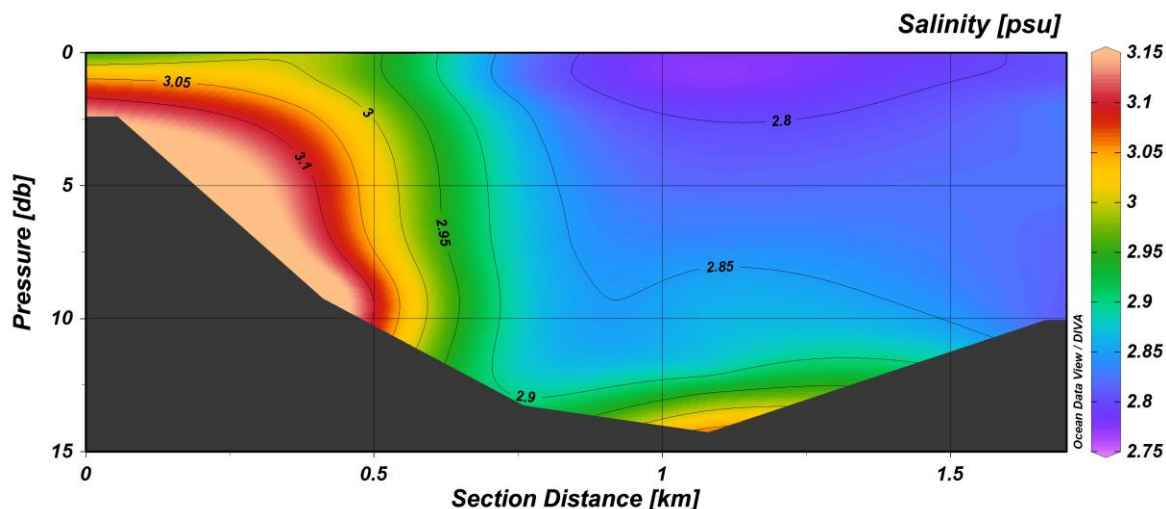


Рисунок 3.1. Основная схема расположения гидрологических станций в проливе Бьеркезунд, выполнявшихся в 2000-2020 гг

Осенне-зимнее выхолаживание приводит к значительному по глубине перемешиванию при температуре наибольшей плотности воды [5]. Так как соленость в проливе имеет диапазон от 2 до 5,5 ‰, то температура наибольшей плотности составляет около 3 °C. Конвективное перемешивание достигает дна в мелководных частях бассейна каждую зиму, а в холодные зимы и глубокие места вентилируются от поверхности до дна. На рис. 3.2 показано распределение температуры и солености осенью 2018г, на ранней стадии выхолаживания, когда температура еще не достигла температуры наибольшей плотности, но достаточно охладилась для перемешивания практически до дна. В относительно мягкие зимы соответственно в глубоководных частях у дна сохраняется вода с характеристиками прежних лет.



(a)



(б)

Рисунок 3.2. Вертикальные разрезы температуры (а) и солености (б) поперек пролива в районе м. Сигнальный по данным 20-21 октября 2018 г.

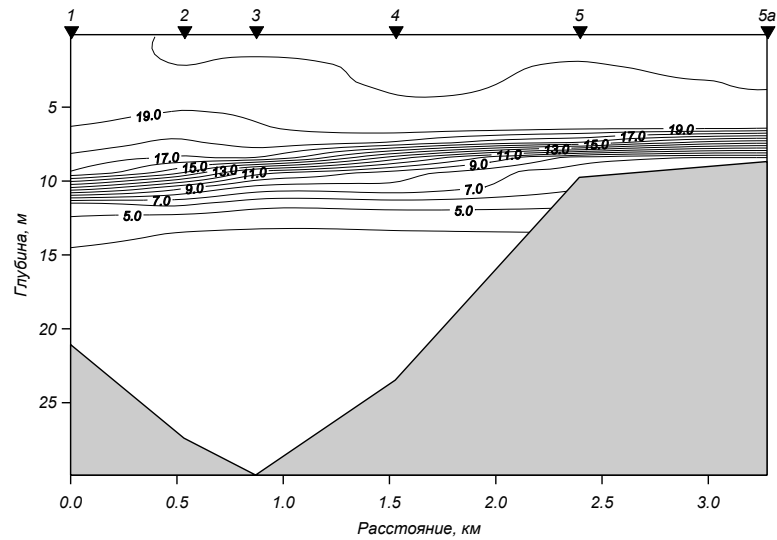
Однако, как показали наблюдения, выполненные в разные годы, перемешиванию по всей толще способствуют и горизонтальные скорости. В поверхностных слоях скорости достигают 30-40 см/с, на глубине 15-18 м в основном до 10 см/с, но в некоторые периоды интенсивного ветрового воздействия горизонтальные скорости и в придонных горизонтах достигают значений 25-30 см/с [15].

При дальнейшем выхолаживании в ноябре-декабре происходит замерзание пролива с образованием устойчивого припая и установление сплошного ледяного покрова в среднем в январе. В отдельные самые мягкие зимы центральная часть в южном секторе пролива могла не замерзнуть. После ввода в строй нефтеналивного терминала и установления круглогодичной навигации в южной половине пролива в течение всей зимы ледоколами прокладывается незамерзающий канал для танкеров. Это приводит к дополнительной торосистости ледяного покрова, изменению теплообмена на

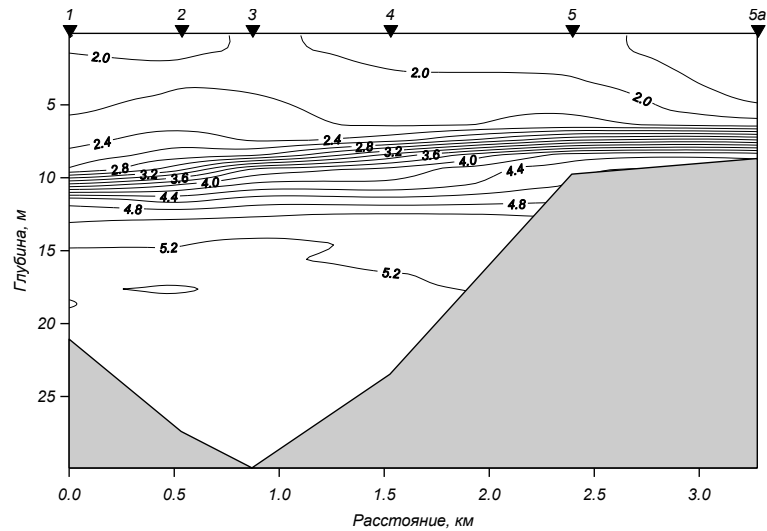
поверхности раздела вода-воздух и другим нарушениям естественного ледового и термохалинного режима. Устойчивый ледовый покров сохраняется в среднем до марта. Подо льдом вся толща перемешана и практически однородна по температуре и солености.

В марте-апреле начинается таяние и разрушение ледового покрова, в мае пролив в основном освобождается от льда и начинается прогревание верхнего слоя и образование летней двухслойной устойчивой стратификации. В летний период верхний слой в проливе (как и во всей ВЧФЗ) прогревается и перемешивается по воздействию ветра и волнения. Толщина этого верхнего перемешанного слоя (ВПС) или квазиоднородного слоя (ВКС) достигает максимального развития в июле-августе и составляет 8-10 м. Температура ВПС в июле-августе может составлять 19-22°C, соленость 2-3 ‰ [5]. Именно в этот период проявляются наиболее характерные и интересные особенности термохалинной структуры бассейна. И в этот же период выполнялись в основном натурные наблюдения.

Хорошо выраженный термоклин наблюдается в среднем на глубине 9-12 м в летние и ранние осенние периоды, температура в нем падает от 16-17 до 5-6 °C, т.е. градиент температуры составляет примерно 5 град/м (рис.3.3). Галоклин или слой высокого градиента солености наблюдается на этих же глубинах от 2-2,5 до 5‰ (рис. 3.3 б). Как отмечалось в [5] термоклин и галоклин приподняты у восточного берега до глубины 8-10 м и заглубляются у западного островного берега до 10-12 м. Глубже термоклина температура изменяется мало и составляет 4-5 °C [5].



(а)



(б)

Рисунок 3.3. Вертикальные разрезы температуры (а) и солености (б)поперек пролива (ст 1-5) по данным 15.07.2001 г.

Соленость глубже 13-14 м также меняется мало по вертикали, но в отдельные годы может составлять 3-4 ‰, а в другие – 5-6‰. Это зависит от затока более соленых или менее соленых вод в пролив или в целом в ВЧФЗ [4], Приложение таблицы 1 и 2].

Итак, первая характерная особенность термохалинной структуры пролива БЗ, (как и всей ВЧФЗ) – устойчивая трехслойная вертикальная структура с хорошо выраженными термоклинном и галоклином в теплый период года и перемешивание и вентиляция всей толщи в осенне-зимний период.

Вторая особенность структуры бассейна пролива БЗ заключается в следующем. В летний период при спокойной погоде при переменных слабых ветрах и высокой температуре, т.е. при отсутствии сильного ветра с постоянным направлением, в верхнем перемешанном слое формируются хорошо выраженные разно направленные вихревые образования [16]. Наиболее значительный вихрь циклонического характера (против часовой стрелки) образуется в центральной части пролива, иногда расположен севернее у острова Равица, иногда южнее, у южных «ворот» пролива (рис. 3.4).

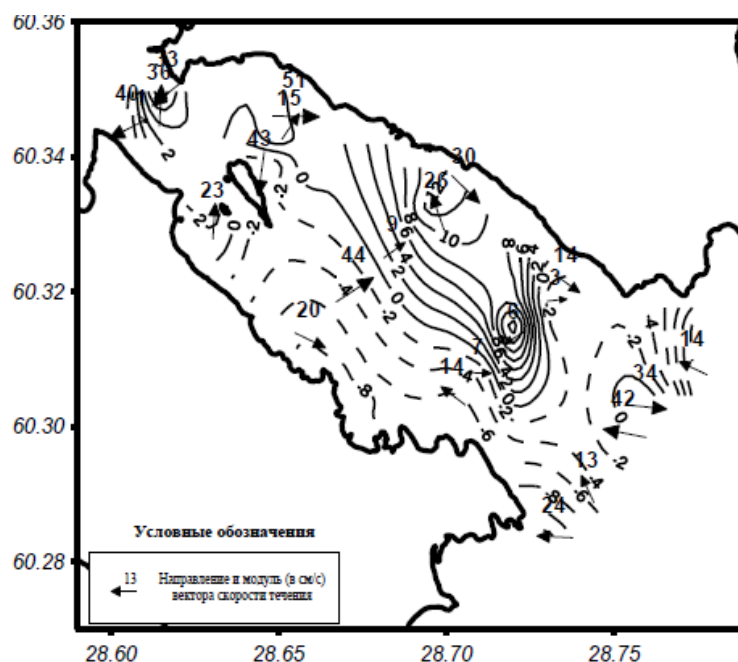


Рисунок 3.4. Горизонтальные скорости течений (векторы-стрелки определенной длины и направления) и вертикальные движения (изолинии см/с) на горизонте 2 м по данным съемки с помощью ADCP –14.09.2000 г.

Этому способствует то, что вдоль материкового восточного берега пролива течение в ВПС преимущественно направлено на северо-запад. Это соответствует общему движению воды в ВЧФЗ на запад вдоль северного берега. Вдоль «островного» берега течение направлено на юго-восток. Но кроме этого основного вихревого образования наблюдаются и другие вихри, связанные в том числе с топографией дна и с положением острова Равица. На фоне этих вихревых образований в отдельных частях пролива могут наблюдаться локальные зоны подъема и опускания вод. На картах горизонтального распределения температуры и солености на поверхности и на горизонтах 2, 5 10 м они выражаются соответственно в участках с замкнутыми изолиниями (рис. 3.5) с повышенной или пониженной температурой.

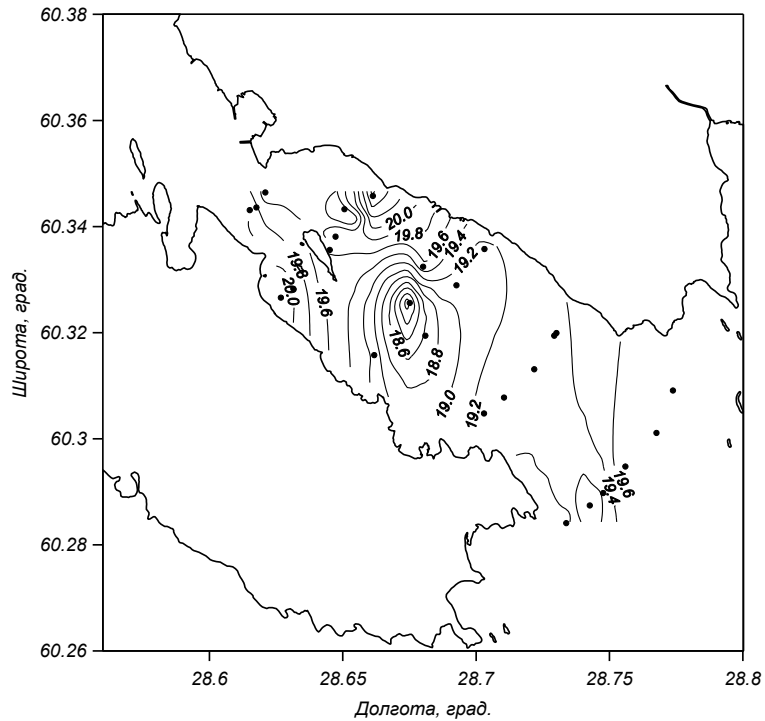
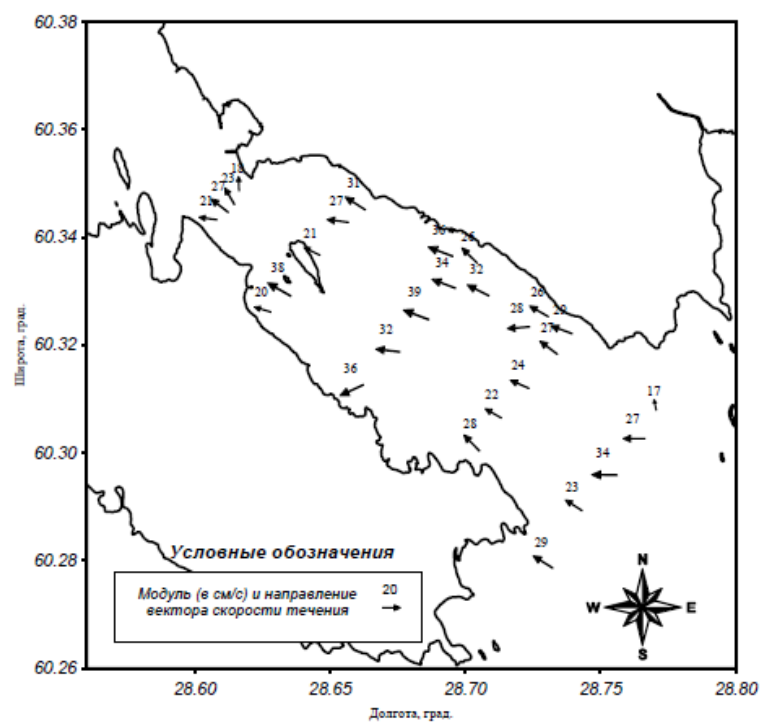


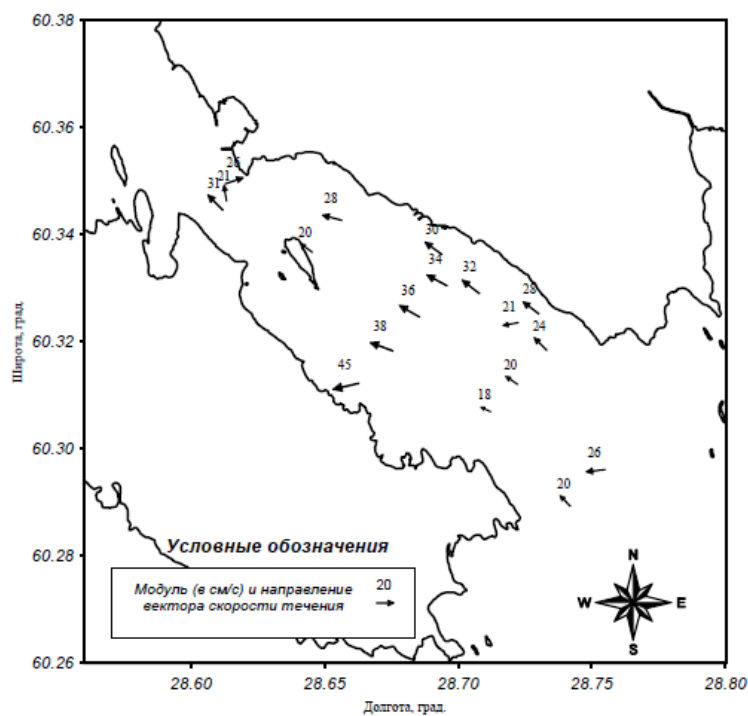
Рисунок 3.5. Распределение температуры на горизонте 5 м по данным съемки 15.07.2001 г.

Предполагается, что эти две вышеуказанные характерные особенности позволит воспроизвести гидродинамическая модель.

Наконец, третья особенность термохалинной структуры, также тесно связанная с метеорологическими условиями и динамикой бассейна, заключается в следующем. Наблюдались периоды, когда вся толща вод в южной и центральной части пролива БЗ охвачена течением, направленным на северо-запад (рис. 3.6). Такие условия наблюдались, например, в июле 2002г [15].



а)



б)

Рисунок 3.6. Горизонтальные скорости течения на горизонтах 3 м (а) и 15 м (б). Съемка 16.07.2002 г.

Трехслойная термохалинная структура тогда практически разрушается, вихревые образования размываются. Такие условия могут наблюдаться при достаточно сильном (5-10 м/с и более) и продолжительном (от нескольких часов до суток) ветре южной четверти, формирующем дрейфовое течение по всей глубине пролива. Или если в ВЧФЗ наблюдается общий наклон уровня от повышенных значений у южного берега до понижения уровня у северного берега, то во всей ВЧФЗ и в проливе БЗ в том числе формируется градиентное течение с юга на север [16]. Возможно механизм формирования таких условий поможет объяснить использование в дальнейшем гидродинамического моделирования, но не в рамках данной работы.

Глава 4. Численные эксперименты с моделью пролива Бьеркезунд

Цель численных экспериментов на программный комплекс (ПК) CARDINAL заключалась в воспроизведении термохалинной структуры пролива БЗ и выяснении возможных механизмов, которые приводят к формированию отдельных характерных особенностей режима. Основное внимание было сосредоточено на термической составляющей, т.е. на воспроизведении распределения температуры

Эксперименты проводились на модели пролива с заданными очертаниями береговой линии и рельефом дна пролива на криволинейной сетке. Указанные массивы береговой линии и глубин были получены из проекта, выполненного К.А. Клеванным для других задач. В модели открытыми границами считались южный и северный входы из пролива от северного мыса на о-ве Северный Березовый до берега и от мыса на юго-восточной оконечности о-ва Большой Березовый до берега соответственно. Боковая граница с Березовыми островами считалась твердой, т.е. водообмен

между островами через достаточно узкий пролив считался пренебрежимо малым.

Горизонтальные скорости течения, распределение температуры и солёности рассчитывались на трехмерной модели в 15 слоях с переменным шагом по вертикали (у поверхности толщина слоев от 0,5 м до 1 м, на глубине - 2-3 м) и с заданной переменной глубиной. Скорости ветра и давление на поверхности задавались в упрощенном виде, примерно соответствующем летним условиям в акватории. Начальная температура на поверхности составляла 20°C. Начальный профиль температуры во всех точках – линейное понижение температуры с глубиной. Задавались четыре варианта ветровых условий на поверхности: 1) слабый ветер – 3 м/с юго-восточного (135°) направления; 2) слабый ветер 3 м/с северо-западного направления (315°); 3) сильный ветер - 10 м/с юго-восточного направления; и 4) сильный ветер 10 м/с северо-западного направления. На северной открытой границе задавался постоянный отток воды с расходом 1500 м³/с, а на южной границе - приток воды такого же объема. Стационарный режим устанавливался после примерно за 12 расчетных часов.

Результаты моделирования представлены на двух разрезах Р1 в северной части и Р2 в южной части пролива (рис. 4.1), положение которых примерно соответствует фактически выполненным разрезам во время практик в разные годы в летние месяцы.

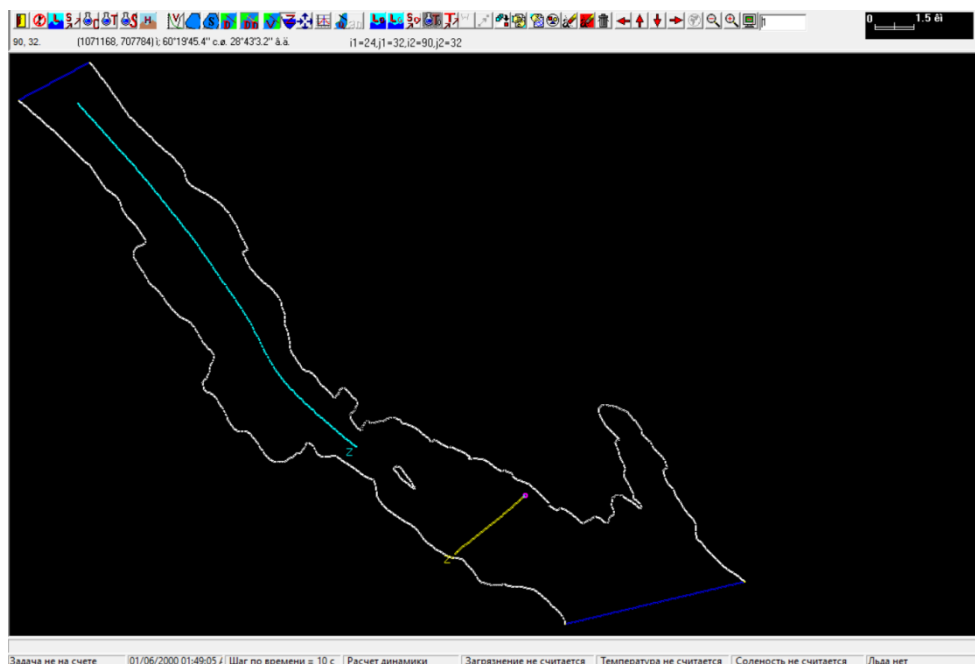


Рис. 4.1 Береговая черта, открытые границы и положение модельных разрезов в численных экспериментах на модельном комплексе CARDINAL

На рис. 4.2 и 4.3 представлено фактическое и воспроизведенное на модели распределение температуры в северной части пролива.

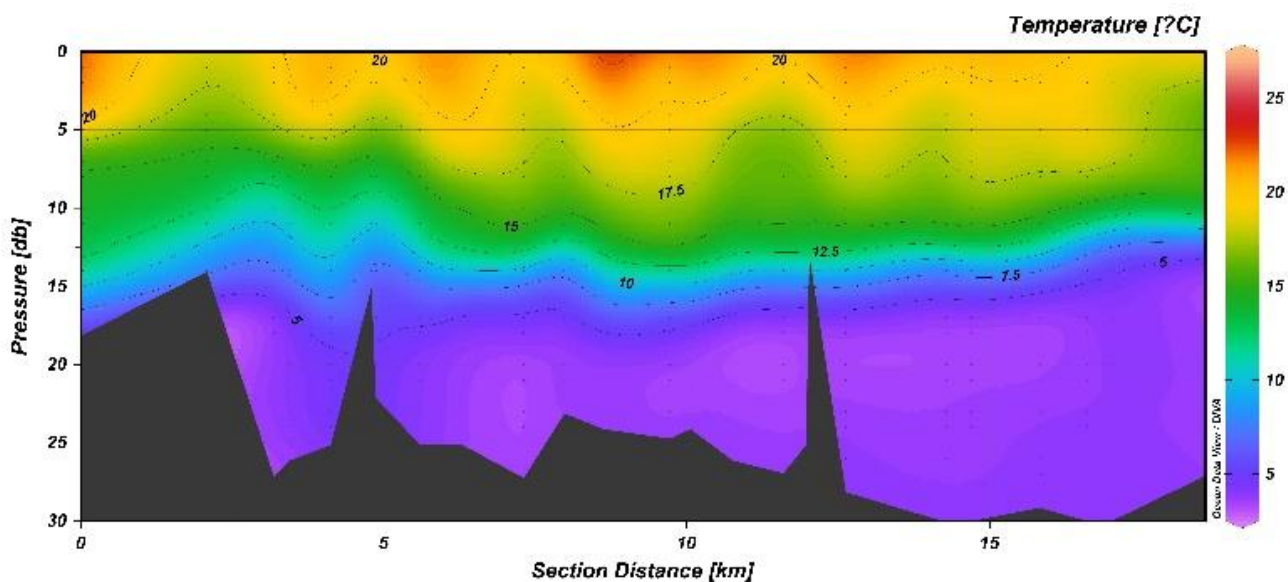


Рис. 4.2. Фактическое распределение температуры на разрезе в северной части пролива 10.-18.06.2021и положение разреза

Видно, что распределение температуры по вертикали примерно соответствует фактическому, т.е. можно выделить три слоя: верхний с температурой 17-22°C, нижний - с температурой 2-7°C и промежуточный – с температурой 7-16°C. Однако верхний перемешанный слой и термоклин не выражены так ярко, как на фактическом распределении. Это объясняется тем, что в начальный момент времени мы задаем линейный профиль понижения температуры с глубиной. За время расчета в течение 24 час после установления профиль меняется не значительно, то есть не формируется ярко выраженная трехслойная структура. Возможно, в ПК CARDINAL надо задавать сугубо переменный по глубине коэффициент прозрачности или обостренный суточный ход потока тепла на поверхности. В наших экспериментах мы использовали стандартные, осредненные параметры потоков тепла.

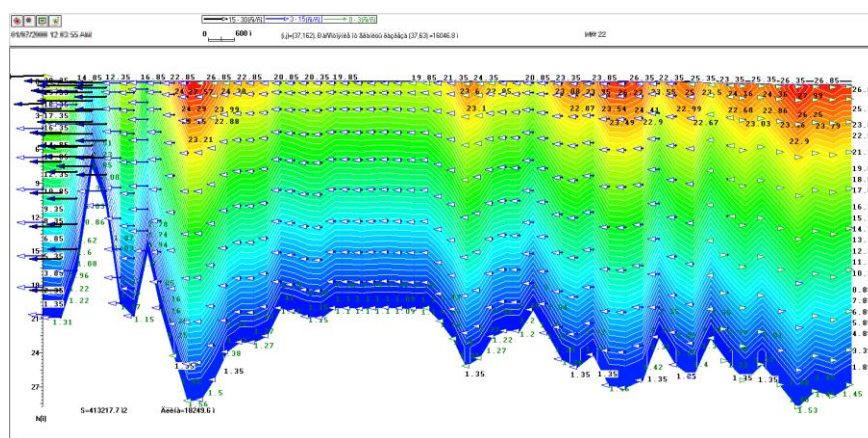


Рис. 4.3 Распределение температуры на разрезе P1 при задании на поверхности ветра со скоростью 3 м/с и направлении 135°. Показаны также векторы скорости течения в плоскости разреза.

На рис 4.3. в верхнем слое отчетливо проявляются пятна воды с повышенной температурой, которые присутствуют также и на фактическом распределении (рис. 4.2). Эти локальные очаги теплой воды соответствуют, по-видимому, вихревым образованиям в поверхностном слое. При задании ветра того же юго-западного направления, но с постоянной скоростью 10 м/с, верхний слой оказывается перемешанным полностью и явных очагов теплой воды не наблюдается (рис. 4.4)

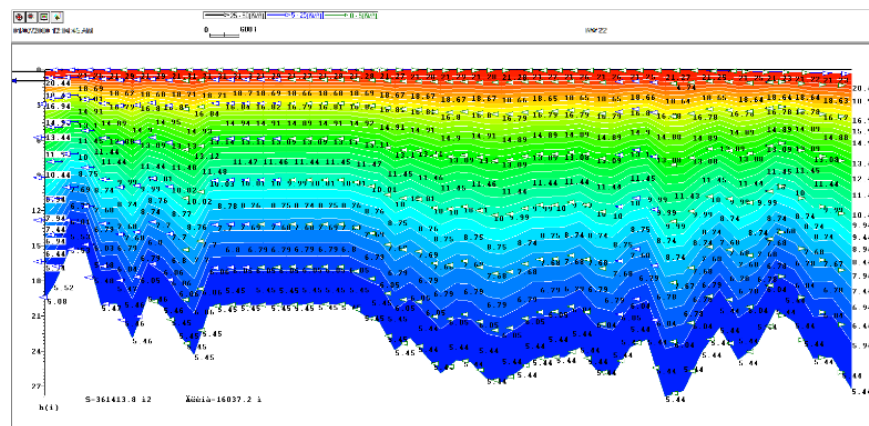


Рис. 4.4 Распределение температуры на разрезе P1 при задании на поверхности ветра со скоростью 10 м/с и направлении 135°. Показаны также векторы скорости течения в плоскости разреза.

Моделирование динамики в проливе Бьеркезунд не ставилось самостоятельной задачей данной работы, но ПК CARDINAL позволяет рассчитывать скорости течений во всей толще бассейна. Поэтому в численных экспериментах в результатах выводились и скорости течений. Скорости течений на рис 4.3 и 4.4 показаны в виде векторов - стрелок разной длины. Видно, что максимальные скорости воспроизводятся у северной границы, где постоянно задается отток воды и к нему добавляется поток за счет дрейфовой скорости. Поэтому на рис. 4.4 стрелки векторы у границы достигают значений 25-50см/с при сильном ветре ЮЗ направления, а при

слабом ветре скорости ограничены значениями 15-25 см/с. В основной толще воды на разрезе скорости течения при слабом ветре не превышают 3-5 см/с, а при сильном ветре достигают 10 см/с, что вполне логично.

Сравним результаты моделирования с фактическим распределением температуры, полученным в центральной (рис.4.5) части пролива.

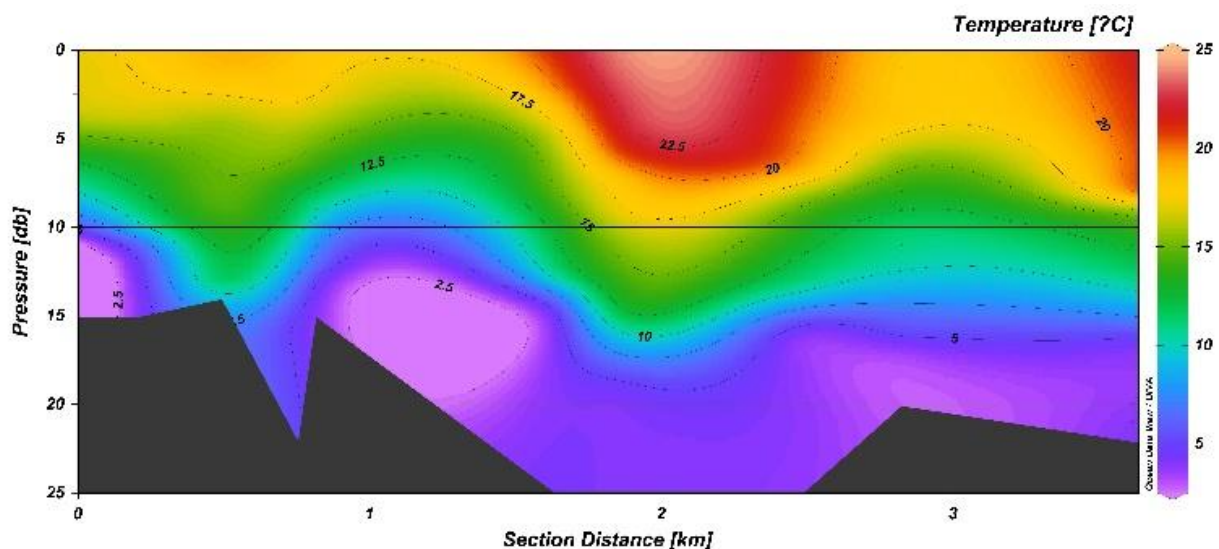


Рис. 4.5. Фактическое распределение температуры на разрезе в центральной части пролива 10.-18.06.2021и положение разреза на схеме пролива

Результаты моделирования в южной части пролива представлены на модельном разрезе P2 (см. рис. 4.1 и 4.6)

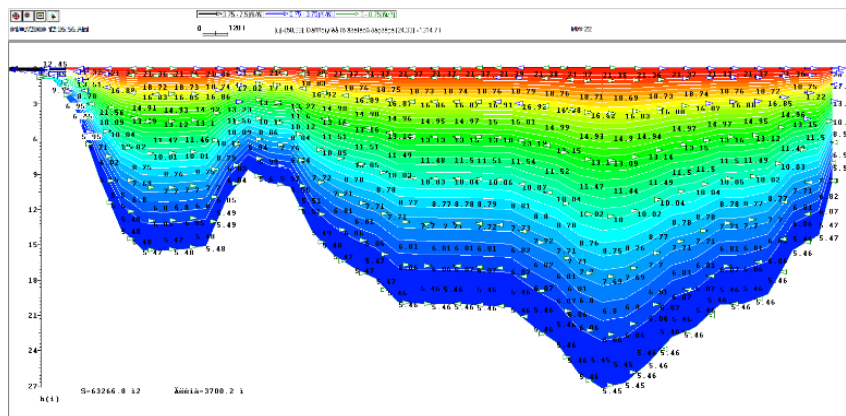


Рис. 4.6 Распределение температуры на разрезе P2 при задании на поверхности ветра со скоростью 3 м/с и направлении 135°. Показаны также векторы скорости течения в плоскости разреза.

Видно, что вертикальное распределение температуры воспроизведено верно в общих чертах, так изолинии температуры в верхнем слое испытывают незначительные колебания, а в нижнем слое частично повторяют рельеф дна. Выраженный термоклин в модельном распределении отсутствует. То есть сказывается недостаток, указанный выше, начальный линейный профиль температуры изменяется не значительно, и слой повышенного градиента не наблюдается.

На рис 4.6, как и ранее, показаны векторы скорости течения в плоскости разреза. Очевидно, что составляющая скорости течения, перпендикулярная оси пролива существенно меньше чем продольная, и на разрезе составляет от 0,4 до 3-4 см/с. Тем не менее, наличие компоненты скорости поперек оси пролива, говорит о том, что модель в принципе может воспроизводить вихревые образования.

Заключение

Анализ полученных в выпускной квалификационной работе результатов позволяет сделать следующие основные выводы.

1. На основе многолетних наблюдений, выполненных студентами и сотрудниками РГГМУ в проливе Бьеркезунд в восточной части Финского залива (ВЧФЗ), выявлены характерные черты термохалинной структуры вод пролива.

2. Термохалинная структура вод пролива Бьеркезунд формируется под влиянием общей динамики ВЧФЗ и атмосферного воздействия на поверхности бассейна.

3. Характерными чертами структуры вод пролива являются, во-первых – формирование трехслойной термической структуры в теплую половину года. Тогда как в осенне-зимний период конвекция перемешивает бассейн практически до дна.

Вторая особенность: в летний период при слабом ветре переменных направлений в верхнем перемешанном слое пролива формируются вихревые структуры с характерными очагами или пятнами воды с повышенной температурой.

Третья особенность: при сильном и устойчивом в течение нескольких часов ветре верхний слой перемешивается, и вихревые структуры в нем размываются. При особенно сильном ветре, направленном вдоль оси пролива, вся толща может быть охвачена потоком одного направления.

4. Программный комплекс CARDINAL был применен для воспроизведения некоторых характерных особенностей термической структуры пролива Бьеркезунд.

5. Воспроизведена трехслойная термическая структура на вертикальных разрезах в проливе. Однако ярко выраженного термоклина получено не было, т.к. были учтены не все параметры переноса тепла по вертикали.
6. Были воспроизведены очаги теплой воды, связанные с разнонаправленными движениями воды в верхнем слое бассейна при относительно слабом ветровом воздействии (примерно 3 м/с)
7. Численные эксперименты показали, что при постоянном и достаточно сильном ветре (10м/с), направленном вдоль оси пролива, верхний слой перемешивается, и очаги тепла и вихревые структуры размываются.

Использованные источники

1. «Карта, Финский залив, Сестрорецк Кронштадт, лист 22» Хворов Г., гл. ред., 2012
2. Расписание погоды, данные метеостанции Лаппеенранте (аэропорт), период с 2018 до 2020 г. Доступ: [https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Лаппеэнранте_\(аэропорт\).](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Лаппеэнранте_(аэропорт).)
3. Нежиховский Р.А. Река Нева и Невская губа - Л.: Гидрометеиздат, - 1981, - 112с.
4. Финский залив. Справочные данные. Доступ: <https://waterresources.ru/zalivy/finskiy-zaliv/>
5. Лукьянов С.В., Пнюшков А.В., Степанов О.В. Распределение гидрологических показателей по акватории пролива Бьёркёзунд. В сборнике: Природная среда побережья и акватории Финского залива (район порта "Приморск") /Ред. Е.А. Волковой, В.Н. Храмцова, Г.А. Исаченко.- Санкт-Петербург, 2003. С. 81-86.
6. Аверкиев А.С., Лукьянов С.В., Татаренко Ю. А. Термохалинная структура вод восточной части Финского залива в безлёдный период по экспериментальным данным// Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», СПб.: ХИМИЗДАТ, 2019. – с. 39-43 (1023 с. ISBN 978-5-93808-336-3).
7. Аверкиев А.С., Иванов В.В., Лукьянов С.В., Смирнов Ю.Ю. Термохалинная структура вод в проливе Бьеркезунд. - В сборнике: XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования - в практику берегопользования». Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием. Калининград, 2022. С. 205-207.
8. Владимирова О.М. Вклад растворенного органического вещества в баланс азота и фосфора в Финском заливе на основе математического

моделирования/ Дисс. на соискание степени канд. геогр. наук, 2019 / Рук-ль
Еремина Т. Р. Доступ: https://disser.spbu.ru/files/2019/disser_vladimirova.pdf

9. Annual Reviews of climate data and its weather Resources for public use, 2021. РФ, Климатические синоптические данные из Выборга: Службы, база данных. Формат данных: карта. Режим доступа: свободный

<https://weatherspark.com/map?id=95778&pageType=7&yearNumber=2023/>
(дата обращения: 18.05.2023)..

10. База данных: Формат данных: таблицыexcel. Режим доступа: свободный<https://iridl.ldeo.columbia.edu> (образовательный инструмент для институционального применения)

11. Изменение береговой зоны восточной части финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов / М.А. Спиридонов, Д.В. Рябчук, К.К. Орвику, Л.Л. Сухачева, Е.Н. Нестерова, В.А.Жамойда // Человек: образ и сущность : гуманитарные аспекты : науч. журн. Доступ: <http://www.evengusev.narod.ru/laptev/spiridonov-2010.html>

<http://www.evengusev.narod.ru/laptev/spiri-3.jpg>

12. Ледовый атлас Финского залива, База данных: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт ААНИИ,© 2021: Ледовый атласы Финского залив. Данных в формате карты из атласов \ Режим доступа: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0040/arctic/old/>

13. FinishMeteorologicalInstitute Ледовый FMI, База данных:Климатологическое исследование по морской статистике, изучение ледяного покрова моря зимой, защита ледовых сезонов, описания, с 1996 по 2021 г: Восточная часть Финского залива. Данные в формате таблиц с сайта. Режим доступа: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/ice-winter-2010-2011>

14. Клеванный К. А. Применение программного комплекса, CARDINAL // Hydrodynamicandwaterpollutioncomputerprogram: список всех

проектов, выполненных с использованием cardinalsoft, 2023 -Режим доступа:
http://cardinal-hydrosoft.ru/?page_id=323&lang=en

15. Иванов В.В., Лукьянов С.В., Пнюшков А.В. Гидродинамические условия пролива Бьеркезунд. В сборнике: Природная среда побережья и акватории Финского залива (район порта "Приморск"). Санкт-Петербург, 2003. С. 86-91.

16. Иванов В.В., Лукьянов С.В., Шевчук О.И., Татаренко Ю.А., Смирнов Ю.Ю., Благодатских Е.А. Особенности гидродинамических процессов в проливе Бьеркезунд. Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием. Калининград, 2022. С. 205-207.- с.219-221

Приложение

Таблица 1 Пример набора данных по температуре воды, один из большого числа наборов

№, Ст	Дата меся ц	Врем ячас: мин	h	Тем воды °C на h
2.1	12.06	14:54	0	18.8
2.1	12.06	14:40	16.2	7.9
2.2	12.06	16:08	0	18.9
2.2	12.06	16:29	10	9.4
2.2	12.06	16:20	15	6.3
2.3	12.06	17:26	0	18.4
2.3	12.06	17:07	15	6.5
2.4	12.06	18:23	0	17.5
2.4	12.06	18:12	15	9.8
1.1	13.06	15:30	0	18.9
1.1	13.06	15:35	5	18.4
1.2	13.06	15:57	0	17.9
1.2	13.06	16:08	5	17.3
4.1	16.06	17:15	0	17.4
4.1	16.06	18:18	5	16.9
4.1	16.06	18:30	10	16.6
4.1	16.06	18:45	15	8.2
5.1	17.06	13:21	0	17.6
5.1	17.06	13:34	12	6.3
5.2	17.06	14:46	0	17.6
5.2	17.06	14:59	18	6
3.2	17.06	15:23	0	17.5
3.2	17.06	15:32	18	5.7
5.4	17.06	16:19	0	17.8
5.4	17.06	16:30	18	6.4

3.6	17.06	16:59	0	17.7
3.6	17.06	17:20	8	9.6
Учеб	19.06	14:00	5	Без данны х
Учеб	19.06	14:15	10	
Учеб	19.06	16:05	0	
M1.1	20.06	14:27	0	23.5
M1.1	20.06	14:47	10	15.3
M1.2	20.06	16:00	0	21.6
M1.2	20.06	16:15	10	15.8
M1.3	20.06	17:44	0	21.1
M1.3	20.06	17:34	10	14.6
M2.1	21.06	13:50	7.3	18.1
M2.1	21.06	14:05	0	18.8
M2.3	21.06	14:50	10	16.5
M2.3	21.06	15:00	0	20.9
M2.5	21.06	16:30	10	15.8
M2.5	21.06	16:43	0	20.7
M3.1	22.06	13:51	10	15.3
M3.1	22.06	14:02	0	22
M3.3	22.06	14:48	10	16.5
M3.3	22.06	15:03	0	20.9
M3.5	22.06	16:20	0	22.1
M4.2	23.06	15:44	10	21.7
M4.2	23.06	15:54	0	23.8
M4.4	23.06	16:37	10	17.8
M4.4	23.06	16:46	0	23.2
1.7	13.06	13:15	0	18.7
1.7	13.06	13:53	12	6.7
?	13.06	15:56	0	18.9
?	13.06	16:13	15	6.9
1.8	13.06	16:45	0	17.6
1.8	13.06	17:11	10	9.3
3.1	17.06	13:36	0	17.6

3.1	17.06	14:05	10	6.4
3.2	17.06	14:15	0	17.6
3.2	17.06	14:45	10	6.5
Б1.1	20.06	13:10	0	22.03
Б1.2	20.06	13:30	0	21.6
Б1,3	20.06	14:02	10	16.4
Б1,4	20.06	14:26	0	20.06
Б1,5	20.06	14:49	11	14.02
Б1,6	20.06	15:12	0	21.07
Б2,1	21.06	14:42	0	21.4
Б2,2	21.06	14:44	10	15.3
Б2,3	21.06	15:00	0	20.9
Б2,4	21.06	15:20	10	16.1
Б2,5	21.06	15:45	0	21.3
Б2,6	21.06	15:50	10	15.6
Б3,1	22.06	13:52	0	19.7
Б3,2	22.06	13:53	8	15
Б3,3	22.06	14:10	0	20.5
Б3,4	22.06	14:14	10	14.5
Б3,5	22.06	14:30	0	21
Б3,6	22.06	14:35	10	14.2

Таблица 2. Данные по определению растворенного кислорода в пробах в проливе БЗ Финского залива.

№ Ст	№, Месяц	Врем час: мин	h	D
2.1	12.06	14:55	0	0.07
2.1	12.06	14:50	16.2	0.05
2.2	12.06	16:08	0	0.06
2.2	12.06	16:29	10	0.06
2.2	12.06	16:20	15	0.14

2.3	12.06	17:26	0	0.05
2.3	12.06	17:07	15	0.16
2.4	12.06	18:23	0	0.04
2.4	12.06	18:12	15	0.05
1.1	13.06	15:33	0	-
1.1	13.06	15:36	5	-
1.2	13.06	15:47	0	-
1.2	13.06	16:11	5	-
4.1	16.06	17:15	0	0.03
4.1	16.06	18:19	5	0.048
4.1	16.06	18:31	10	0.038
4.1	16.06	18:46	15	0.085
5.1	17.06	13:22	0	0.047
5.1	17.06	13:35	13	0.052
5.2	17.06	14:46	0	0.051
5.2	17.06	15:00	18	0.049
3.2	17.06	15:24	0	0.048
3.2	17.06	15:33	18	0.044
5.4	17.06	16:20	0	0.045
5.4	17.06	16:30	18	0.053
3.6	17.06	17:05	0	0.052
3.6	17.06	17:20	8	0.05
Учеб	19.06	14:05	5	0.09
Учеб	19.06	14:15	10	0.07
Учеб	19.06	16:05	0	0.06
М1.1	20.06	14:27	0	0.06
М1.2	20.06	14:47	10	0.05
М1.2	20.06	16:00	0	0.05
М1.2	20.06	16:15	10	0.045
М1.3	20.06	17:44	0	0.05
М1.3	20.06	17:34	10	0.06
М2.1	21.06	13:50	7.3	0.05
М2.1	21.06	14:05	0	0.06

M2.3	21.06	14:50	10	0.05
M2.3	21.06	15:00	0	0.055
M2.5	21.06	16:30	10	0.065
M2.5	21.06	16:43	0	0.055
M3.1	22.06	13:51	10	0.04
M3.1	22.06	14:02	0	0.045
M3.3	22.06	14:48	10	0.045
M3.3	22.06	15:03	0	0.06
M3.5	22.06	16:20	0	0.05
M4.2	23.06	15:44	10	0.045
M4.2	23.06	15:54	0	0.045
M4.4	23.06	16:37	10	0.04
M4.4	23.06	16:46	0	0.05
1.7	13.06	13:23	0	0.082
1.7	13.06	13:56	12	0.045
	13.06	16:04	0	0.047
	13.06	16:20	15	0.052
1.8	13.06	17:01	0	0.05
1.8	13.06	17:17	10	0.046
3.1	17.06	13:36	0	0.046
3.1	17.06	14:05	10	0.047
3.2	17.06	14:15	0	0.053
3.2	17.06	14:27	10	0.049
Б1.1	20.06	13:10	0	0.049
Б1.2	20.06	13:30	0	0.049
Б1,3	20.06	14:02	10	0.047
Б1,4	20.06	14:26	0	0.052
Б1,5	20.06	14:49	11	0.019
Б1,6	20.06	15:12	0	0.059
Б2,1	21.06	14:42	0	0.053
Б2,2	21.06	14:58	10	0.055
Б2,3	21.06	15:10	0	0.02
Б2,4	21.06	15:25	10	0.058

Б2,5	21.06	15:47	0	0.047
Б2,6	21.06	15:52	10	0.043
Б3,1	22.06	13:54	0	0.048
Б3,2	22.06	13:55	8	0.048
Б3,3	22.06	14:12	0	0.057
Б3,4	22.06	14:15	10	0.052
Б3,5	22.06	14:30	0	0.048
Б3,6	22.06	14:35	10	0.057