

Санкт-Петербургский государственный университет

*МАХОВИКОВ Алексей Дмитриевич*

**Выпускная квалификационная работа**

**ВЛИЯНИЕ МЕЖСЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕРМОХАЛИННОЙ  
СТРУКТУРЫ ВОД НА ЭКОСИСТЕМЫ ПОЛУИЗОЛИРОВАННЫХ ПРИЛИВНЫХ  
АКВАТОРИЙ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ**

Магистратура:

05.04.04 «Гидрометеорология»

ВМ.5779.2021 «Гидросфера и атмосфера: моделирование и прогноз»

**Научный руководитель:**

Старший преподаватель кафедры океанологии СПбГУ

к.г.н. Смагин Р.Е.

**Рецензент:**

PhD, postdoctoral position at University of Exeter

к.б.н. Evgeny Genelt-Yanovskiy

Санкт-Петербург

2023

## Оглавление

Введение.....	3
ГЛАВА 1.....	5
Физико-географическая характеристика района исследований.....	5
Актуальность изучения полуизолированных приливных акваторий.....	10
Глава 2. Океанологические измерения 2017-2023 гг. в районах исследования .....	18
Глава 3. Термохалинный режим полуизолированных приливных акваторий Кандалакшского залива Белого моря .....	30
3.1. Лагуна Колюшковая (с проливом Сухая Салма).....	30
«Осенний» сезон.....	53
3.2. Губа Лебяжья (с проливом Подпахта).....	56
3.3. Губа Летняя .....	64
Зимний сезон.....	66
Глава 4. Влияние термохалинных условий на экосистемы полуизолированных приливных акваторий .....	75
4.1 Губа Летняя .....	76
4.2 Губа Лебяжья.....	78
4.3 Лагуна Колюшковая .....	79
4.4 Особенности измерений в летний и зимний сезоны.....	84
4.5 Сравнение измерений в проливе Сухая Салма и лагуне Колюшковой за отдельные года в зимний и летний сезоны .....	93
Заключение.....	97
Список литературы.....	100
Приложение 1 .....	103

## Введение

Белое море играет важную роль в Арктическом регионе России. Расположенное в области северного полярного круга, оно позволяет изучать различные аспекты, связанные с влиянием природных условий на морскую флору и фауну, на которых сказывается межсезонная изменчивость (между теплым и холодным временем года). Одними из наиболее важных природных факторов, влияющих на экосистему Белого моря являются приливные явления, ледообразование, а также смешение пресных (речных) вод и соленых вод.

У берегов южной части Кандалакшского залива наблюдается большое количество морских заливов и губ, обусловленных специфическим рельефом Северной Карелии сильной изрезанностью береговой линии. За счет послеледникового поднятия суши рельеф может постепенно изменяться. Небольшие мелководные морские заливы могут постепенно осушаться, превращаясь в изолированные водоемы и болота, расположенные на берегу моря. Однако, если залив более глубокий, то после поднятия суши может образоваться озеро, соединяющееся с морем.

В данной работе рассматриваются три полуизолированных участка морской акватории: губа Летняя, эстуарная система пролив Подпахта-губа Лебяжья и система пролив Сухая Салма-лагуна Колюшковая. Первые две акватории в настоящий момент являются морскими заливами, но в дальнейшем они могут отделиться от моря вследствие поднятия суши. Последняя акватория уже является полуизолированной приливной акваторией. Было выбран именно такой термин, так как отделение от суши происходит на длительном временном отрезке, и важной промежуточной стадией данного процесса является стадия, на которой во время высокого прилива акватория становится морским заливом, а в остальное время акватория остается озером на берегу моря. Подобные акватории заметно влияют на местные морские экосистемы.

Площадь полуизолированных приливных акваторий, как правило, составляет меньше 1 км<sup>2</sup>, при этом они расположены вблизи уреза воды. Данные акватории проблематично изучать с помощью доступной спутниковой информации из-за недостаточного пространственного разрешения. Поэтому, для изучения таких акваторий подходят в первую очередь натурные (полевые) данные, полученные в ходе непосредственных измерений (*in situ*) при различных астрономических и сезонных условиях. Автор принимал активное участие именно в таких исследованиях.

Целью данной работы является определение влияния межсезонной изменчивости термохалинной структуры вод на морские экосистемы полуизолированных приливных акваторий Кандалакшского залива Белого моря. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Определить типичные полуизолированные приливные акватории Кандалакшского залива;
- 2) Провести сбор натуральных данных (сезоны 2017 – 2023 гг.) в системах пролив Сухая Салма-лагуна Колюшковая, пролив Подпахта-губа Лебяжья, и губе Летняя.
- 3) Создать базу данных с результатами натуральных съемок для основных измеряемых параметров: температура воды, соленость, плотность и др.
- 4) Проанализировать изменчивость термохалинной структуры вод за период 2017 – 2023 гг., включая летние и зимние сезоны.
- 5) Определить степень влияния межсезонной изменчивости термохалинной структуры вод на морские экосистемы, в частности, популяции трехиглой колюшки.

# ГЛАВА 1

## **Физико-географическая характеристика района исследований**

Район проведения исследований в данной работе – часть акватории Кандалакшского залива Белого моря. Белое море расположено в северной части России. Оно принадлежит бассейну Северного Ледовитого океана и граничит с Баренцевым морем. Белое море является окраинным шельфовым морем. (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1991). Площадь моря составляет приблизительно 90000 км<sup>2</sup>, вместе с островами – 90800 км<sup>2</sup> (ЕСИМО).

Белое море делится на северную, южную и среднюю части (рис. 1.1). Северная часть представляет собой своего рода воронку, которая граничит с Баренцевым морем и с Мезенским заливом. Южная часть (Бассейн) является самой большой и занимает всю западную часть Белого моря, в которую включаются Кандалакшская губа, Онежская губа и Двинский залив. Северная и южная части соединены средней частью, которая называется Горлом.

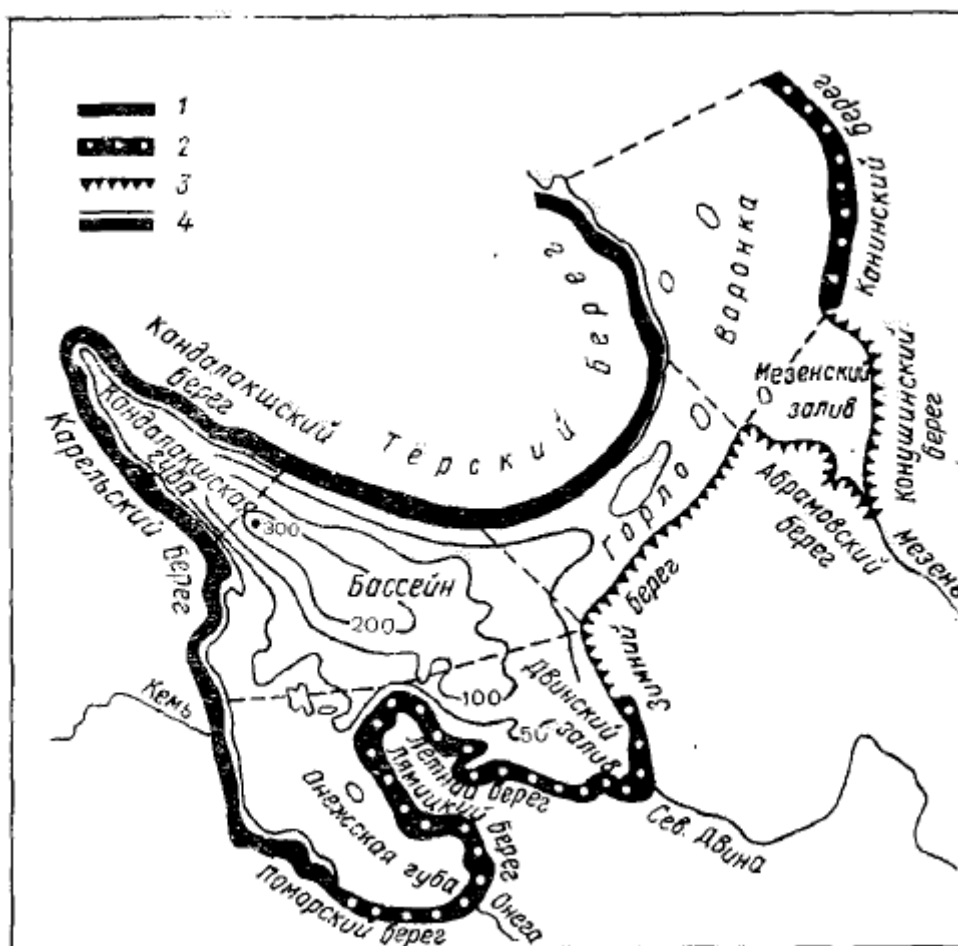


Рис. 1.1. Районы, местные названия и типы берегов, рельеф дна Белого моря (Добровольский, 1982).

Максимальная глубина Белого моря около 350 м (южная часть), средняя глубина – 67 м. Объем вод около 6000 км<sup>3</sup>. (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1991)

Основные морфометрические характеристики Кандалакшского залива: площадь 6500 км<sup>2</sup>, что составляет 7% от всей площади Белого моря; объем вод – 710 км<sup>3</sup>, что является уже 13% от общего объема вод; средняя глубина – 100 м.

**Водные массы** Белого моря образуются при смешении материкового стока и затока вод из Баренцева моря через Воронку и Горло Белого моря. Материковый сток составляет до 4% от общего объема Белого моря. Поверхность моря ежегодно покрывается льдом. Реки, впадающие в море, имеют ярко выраженное половодье в конце весны и низкую межень на протяжении зимнего периода. Среднее значение речного стока в Кандалакшский залив – 18,01 км<sup>3</sup>/год.

**Важной частью циркуляции вод** в Белом море являются приливы и приливные течения. Приливные колебания уровня возникают из-за распространения приливной волны

из Баренцева моря в Белое. В основном, приливы в Белом море полусуточные, однако из-за мелководья полусуточные приливные волны изменяются, вследствие чего в Белом море преобладают  $1/4$  суточные волны  $M_4$  и  $MS_4$  и  $1/6$  суточная волна  $M_6$ .

**Температурный и соленостный режим** водных масс Белого моря имеет следующие особенности: однородные воды в Воронке и Горле и стратифицированные воды в Бассейне, Двинском и Кандалакшском заливах. Поверхность Белого моря хорошо прогревается в летний период, однако за счёт больших глубин и географического расположения глубже 50 метров на водные массы уже не сказывается сезонное изменение температуры. Как уже было сказано выше, материковый сток является важной составляющей в водном балансе Белого моря, вследствие чего в весенний период пресные воды могут распространяться на большие расстояния от берега. В летний период влияние материкового стока уменьшается.



Рис. 1.2. Схема общей циркуляции вод Бассейна (а) и квазипостоянных течений по данным наблюдений (б) (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1991).

Причинами формирования течений (рис. 1.2) являются приливы, ветровое воздействие, изменение атмосферного давления и изменение уровня из-за действия стока рек.

**Рельеф дна Кандалакшского залива** достаточно сложный, поскольку в его пределах расположена самая глубокая часть Белого моря. Средняя глубина залива – 109 м. За счет изрезанности береговой линии в акватории залива расположено большое количество различных губ, проливов и островов, которые представляют интерес для изучения. Преобладающие ветры – северные летом, юго-западные зимой. Приливы в заливе полусуточные с величиной до 2,5 м в северо-западной части залива. Скорости приливно-

отливных течений достигают 50 см/с и их направление зависит от конфигурации береговой линии.

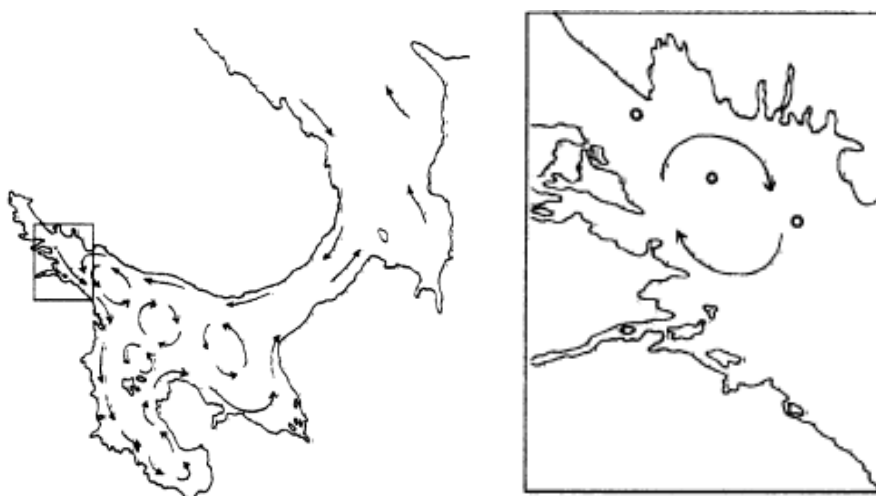


Рис. 1.3. Схема постоянных течений Белого моря с врезкой для Кандалакшского залива (Бабков, 1998).

Распределение температуры и солёности связано с наличием антициклонического круговорота в Кандалакшском заливе (рис.1.3). С ним связана область повышенных температур, а во внутренней части залива температуры уже ниже. На распределение солёности сильно влияет сток рек. Средние значения солёности на поверхности составляют от 20‰ до 26‰ с тенденцией увеличения с северо-запада к юго-востоку. Помимо солёности сток рек сильно влияет и на прозрачность воды, вследствие чего воды у Карельского берега более мутные, чем у Кандалакшского берега (Бабков, 1998).

**Губа Чупа** расположена в южной части Кандалакшского залива Белого моря. Длина губы Чупа в зональном направлении составляет около 37 км, ширина – около 1.5 км. Площадь вод – 57 км<sup>2</sup>, средняя глубина – 20 м, максимальные глубины – до 70 м. За счет наиболее удаленного расположения от открытой части Северного Ледовитого океана климат имеет как континентальные, так и морские черты. Температура воздуха зимой может опускаться до -40°C, а летом подниматься выше 26°C. Наименьшее количество атмосферных осадков наблюдается весной, наибольшее – летом и осенью, среднегодовое количество – около 350-400 мм. Направления ветра летом – преимущественно восточные, зимой – юго-западные.

Губе присуща двухслойная структура воды с границей раздела на глубинах от 35 до 70 м. Верхний слой обычно хорошо перемешан вследствие волновых и приливно-отливных



движений. Этот слой образуется путем смешения материковых пресных вод и баренцевоморских вод, поступающих в Белое море через Воронку. Нижний слой представляет собой холодные и соленые глубинные воды. Иногда температура вод у дна становится отрицательной.

До 80% **теплового баланса губы Чупа** составляет поглощенная солнечная радиация, течения и материковый сток имеют вклад около 17%. Наибольшее значение радиационного баланса приходится на июнь. В оставшиеся летние месяцы значение начинает уменьшаться. Максимальная температура вод за счет более долгого прогрева достигается в августе, минимальная – в январе. Годовая амплитуда температур поверхностного слоя – до 20°C. Температура у дна не превышает 5-6 °C.

Пониженная **соленость** вод губы Чупа связана со стоком рек Кереть, Пулонга и многочисленных малых рек и ручьев. Наибольшие колебания солености наблюдаются зимой и весной за счет распространения речного стока подо льдом и весеннего половодья, соответственно. Сильнее всего подвержен распреснению верхний 2-метровый слой. Придонная и поверхностная соленость всегда ниже в кутовой части губы Чупа, а температура может быть как выше, так и ниже в сравнении с мористой частью губы.

## Актуальность изучения полуизолированных приливных акваторий.

Объектом исследования в данной работе являются полуизолированные приливные акватории Кандалакшского залива Белого моря. Эти географические объекты являются переходным этапом от небольшого морского залива к замкнутому (меромиктическому) озеру, расположенного вблизи берега моря и огражденному от него некоторой перемычкой. Образование таких объектов напрямую связано с продолжающимся поднятием суши, связанное с её освобождением от ледника, что произошло около 12 тыс. лет назад. Скорость данного процесса можно отслеживать с помощью геофизических методов. Как правило, говорят о поднятии большей части Европы – Фенноскандии (физико-географическая страна, расположенная в северо-западной части Европы, в которую обычно включается область Белого моря).

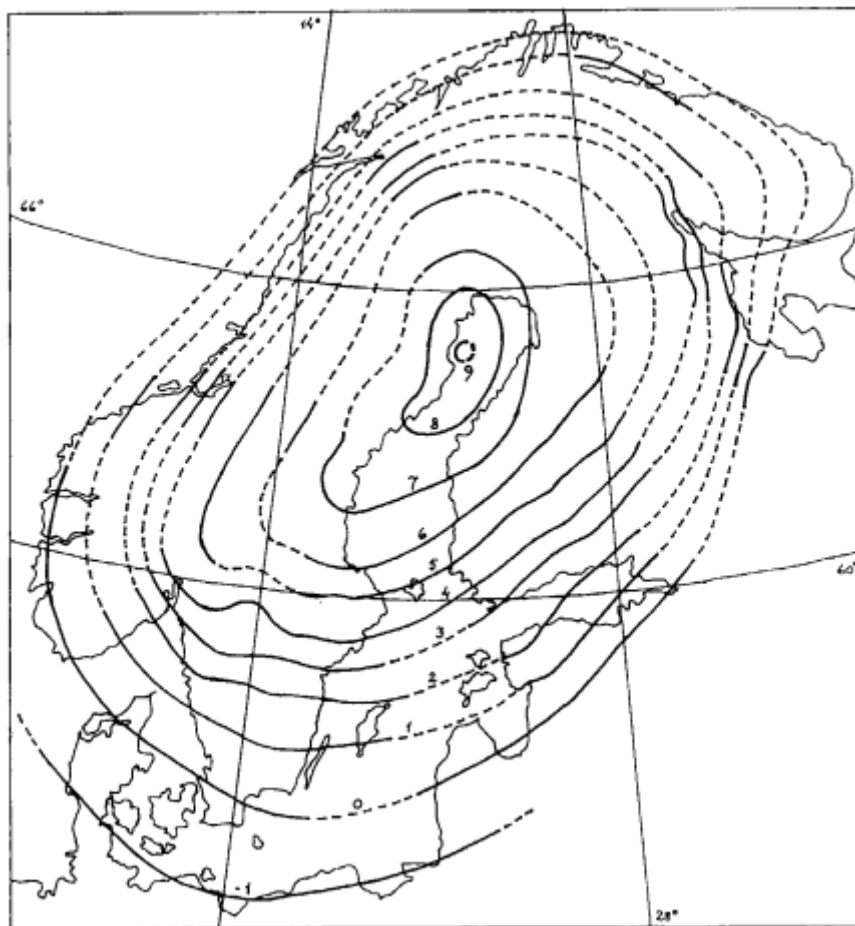


Рис. 1.4. Текущее поднятие Фенноскандии 1892-1991 [мм/год] (Ekman, 1996).

С помощью большой сети геофизических датчиков появилась возможность построить карту изолиний подъема суши всей Фенноскандии (рис.1.4). Согласно ей,

поднятие суши в восточной части Белого моря составляет около 0,5-1 мм/год, а в западной части – в Кандалакшском заливе Белого моря – около 3 мм/год.

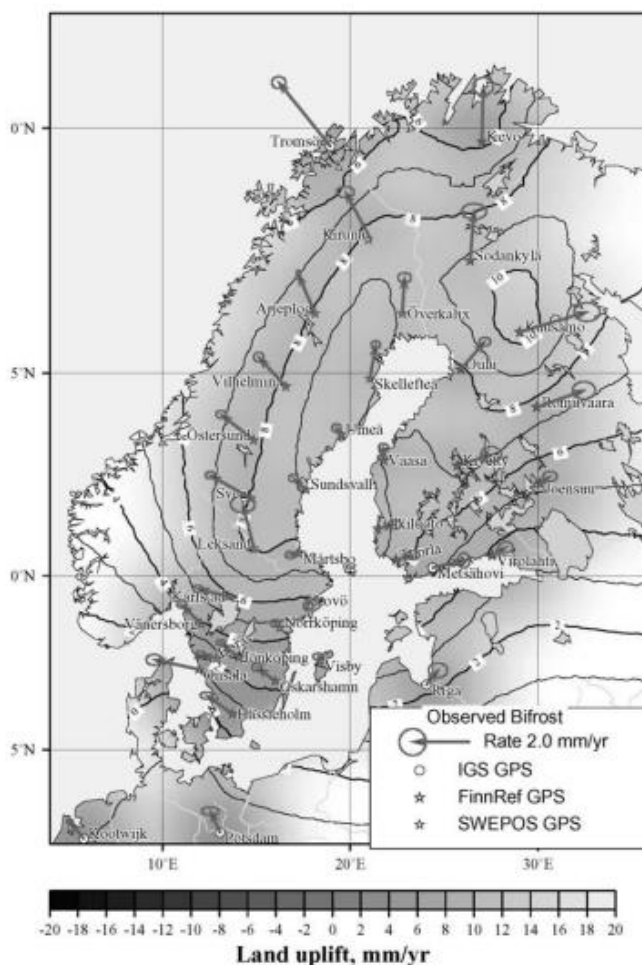


Рис. 1.5. Поднятие Фенноскандии [мм/г] (Scherneck et al., 2003).

Согласно более позднему анализу геофизических данных, представленными Scherneck et al. (2003) послеледниковое поднятие суши в западной части Белого моря составляет до 8-9 мм/год. Таким образом, образование новых географических объектов продолжается и будет продолжаться в ближайшем будущем.

Комплексное изучение полуизолированных приливных водоёмов или акваторий (в зависимости от стадии) Белого моря началось только в конце прошлого века. В том числе и потому, что в пределах Кандалакшского залива расположено несколько научных учреждений и полевых станций ведущих университетов России: ББС им. Н.А. Перцова МГУ им. М.В. Ломоносова, УНБ СПбГУ «Беломорская», ББС ЗИН РАН «Мыс Картеш», УНБ КГУ «Беломорская». Так, например, на Беломорской биологической станции МГУ с 2010 г. активно изучают меромиктические озера (Пантюлин, Краснова, 2011; Краснова, Пантюлин, 2013; Краснова и др., 2014). Главное направление данных работ - фауна и

химический анализ воды в акваториях, находящихся на различных этапах отделения от суши.

Стадии перехода от залива к полностью изолированному пресному озеру видятся примерно таким образом, хотя разные авторы выделяют разное количество этапов. Например, Пантюлиным А.Н. и Красновой Е.Д. были предложены три стадии (Пантюлин, Краснова, 2011):

В 1-й стадии у морского водоёма сохраняется водообмен во время приливов и отливов, однако время прилива начинает уменьшаться, а отлива – увеличиваться. Структура вод по сравнению с окружающими морскими водами уже начинает изменяться, однако незначительно: температура воды может быть на несколько градусов выше, а солёность – на несколько значений ниже.

2-я стадия – прекращение постоянного водообмена с морской акваторией. Вода затекает только во время сизигийных приливов и сильных нагонов. Начинается сильное влияние на структуру вод разных подземных притоков, которые возникают и пропадают время от времени.

На 3-й стадии начинается накопление пресной воды и образование выраженной двухслойной структуры: пресная вода в поверхностном слое и солёная – в глубинном слое. Также на данной стадии может наблюдаться образование сероводородного слоя.

В более поздней работе (Краснова, Мардашова, 2020) предлагаются следующие этапы перехода от морского залива к пресному озеру:

1. морской залив;
2. лагуна с ассиметричными приливами (первая стадия отделения, при которой береговая отмель поднимается над уровнем воды в отлив);
3. меромиктическое озеро с опресненным слоем (забросы морской воды могут происходить во время штормовых нагонах или высоких осенних приливах; начинает образовываться сероводородный слой на дне и распресненный слой на поверхности озера);
4. пресное озеро.

При этом авторы подчеркивают, что между второй и третьей стадией может пройти от 200 до 400 лет.

Одной из важных работ по данной теме является статья 2005 г. (Шапоренко и др, 2005) «Особенности экосистем отшнуровывающихся водоемов Кандалакшского залива

Белого моря». Очень важно сравнивать различные условия в водоемах, находящихся на разных переходных стадиях от морского залива к замкнутому озеру. Авторы статьи описывают комплексные результаты исследований двух таких типов озёр, у которых ещё существует водообмен с морем. Температура воды в озерах получилась на 2-3°C выше по сравнению с внешними (морскими) водами, а температурный максимум располагался на глубинах от 1,2 до 3 метров. Солёность озёрных вод подвержена частым изменениям. Например, на это может влиять небольшие ручьи, впадающие в такие водоёмы, заток солёной воды из моря, ледообразование и др. На концентрацию кислорода сильно влияют погодные условия. Также стоит отметить, что подповерхностный слой оказался сильно перенасыщен кислородом и при отборе проб наблюдалась дегазация воды. На дне этих озёр было обнаружено высокое содержание сероводорода и полное отсутствие кислорода.

Одной из особенностей отделившихся водоемов является присутствие аэробной и анаэробной сероводородной зоны. Например, авторы (Краснова и др, 2020) приводят результаты многолетних (за 10 лет) наблюдений за солёностью и глубиной сероводородного слоя. Были определены диапазоны колебаний солёности для каждого горизонта от 0 до 4 м: наибольшие изменения обнаружены в поверхностном слое, где диапазон изменения солёности составляет от 3,7‰ до 28,2‰. Амплитуда колебаний солёности уменьшается от поверхности до дна. Одним из важных результатов данного исследования является отображение динамики верхней границы сероводородного слоя, который в данном озере либо почти полностью пропадает, либо (в зимний период) поднимается до поверхности (рис.1.6).

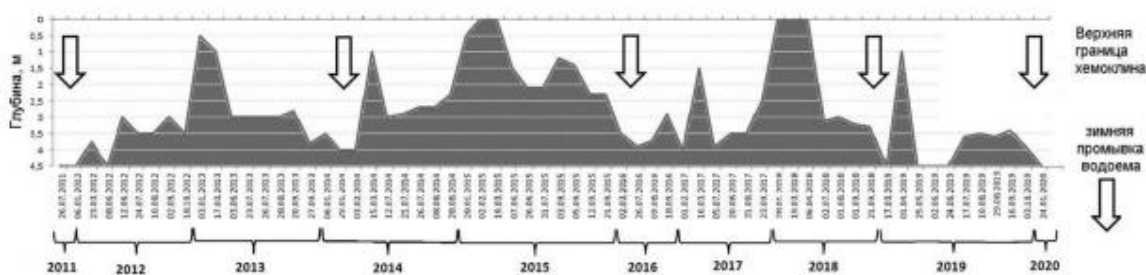


Рис. 1.6. Динамика верхней границы распространения сероводорода в 2011-2020 гг. (Краснова и др, 2020).

Большой интерес представляет исследования большого количества водоемов, которые находятся на разных этапах отделения от моря (Краснова, 2013). Полевые измерения были проведены в конце зимы. По всем водоёмам выявлена стратификация по температуре и солёности. Также во всех водоемах было обнаружено увеличение

концентрации сероводорода с глубиной. В оз. Кисло-Сладком содержание сероводорода оказалось существенно ниже летних значений, что и было подтверждено в 2020 г. статьей выше (рис.1.6).

Другим составом авторов (Лосюк, 2021) даётся уже более полное сравнение нескольких озёр с упором на их сероводородное заражение. Описаны результаты сравнения солёности, растворённого кислорода и сероводорода в разных водоёмах за различные сезоны и года. Стоит рассмотреть подробнее изменение характеристик лагуны, расположенной на Зеленом мысе. По материалам измерений в марте 2012, 2013, 2017 и 2019 гг. оказывается, что изменение солёности имеет очень сильные отличия в зависимости от года. По другим параметрам изменчивость тоже присутствует, однако не такая явная, как по солёности (рис. 1.7). Также в таких лагунах иногда наблюдаются высокие концентрации сероводорода в придонном горизонте, где кислорода уже нет. Поэтому такие озера или лагуны называются меромиктическими (т.е. наполовину перемешанными).

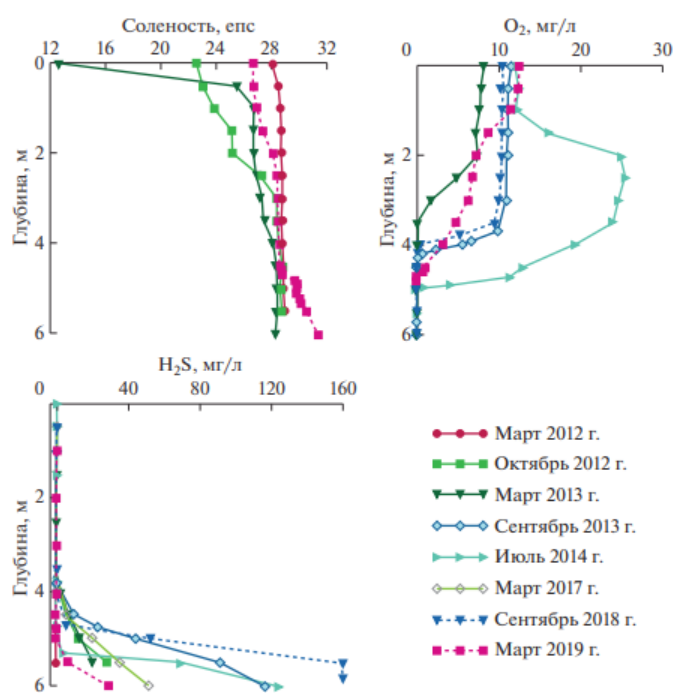


Рис. 1.7. Гидрохимические характеристик лагуны на Зеленом мысе (Лосюк, 2021).

Вышеуказанный водный объект интересен также тем, что в данной работе одним из изучаемых объектов исследования является очень похожая полуизолированная акватория – лагуна Колюшковая (рис.1.8). Она представляет собой полуизолированный мелководный залив площадью 0,058 км<sup>2</sup> максимальной глубиной до 4 м. Он соединен с морем двумя протоками, по которым вода поступает как в залив, так и вытекает оттуда. Уровень воды в лагуне находится выше уровня моря во время отлива. Соединение лагуны Колюшковая и

пролива Сухая Салма, напротив которого она расположена, происходит только во время сизигии в полную воду, что подтверждено нашими натурными наблюдениями (Маховиков и др., 2019; Маховиков и др., 2020). Важно уточнить, что пролив Сухая Салма является скорее не проливом, а замкнутым заливом, внутри которого расположена лагуна Колюшковая. Она является наиболее типичным и теперь уже хорошо изученным полуизолированным водоемом в данной части Кандалакшского залива.

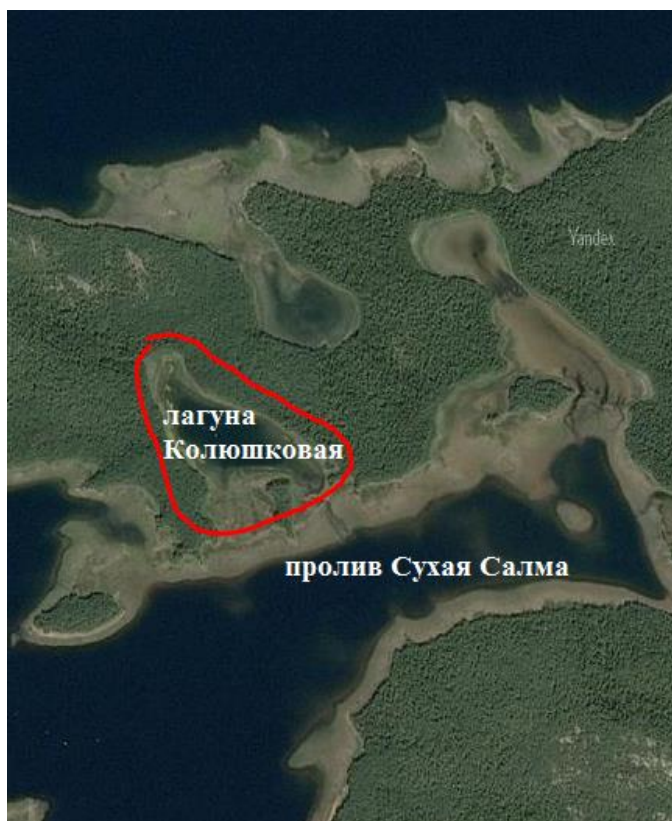


Рис. 1.8. Лагуна Колюшковая и пролив Сухая Салма (Кандалакшский залив, Белое море) (Яндекс. Карты).

Помимо лагуны в данной работе рассматриваются еще два других объекта, относящихся к водоемам, находящихся на различных стадиях отделения от моря: система пролив Подпахта – губа Лебяжья (рис. 1.9) и губа Летняя (рис.1.10).

Губа Лебяжья, в отличие от лагуны Колюшковая, имеет соединение с проливом Подпахта, относящимся к устьевой области реки Кереть. Эта акватория является достаточно широкой и глубокой, вследствие чего у губы Лебяжья в настоящее время отделение от моря выражено слабо. Большой интерес представляет собой небольшой, отделенный каменистой перемычкой, залив внутри губы Лебяжья - «Амазона» (что даже видно на снимке). Амазона будет рассматриваться как часть губы Лебяжьей, но в то же время термохалинные условия в этом заливе имеют свои особенности, которые влияют на

развитие гидробионтов. Поэтому в дальнейшем в тексте при описании губы Лебяжьей будут указаны особенности залива Амазона.



Рис. 1.9. Пролив Подпахта с губой Лебяжьей (Яндекс.Карты).

Объектом, находящимся на начальной, практически незаметной, стадии отделения от моря, является губа Летняя. Она представляет собой узкий вытянутый морской залив, который можно разделить на две неравные части: западную, расположенную вблизи впадения в губу реки Летняя, и восточную – более широкую и длинную. Между этими частями расположено узкое водное пространство, благодаря чему через какое-то время данная губа может превратиться в полуизолированную приливную акваторию.



Рис. 1.10. Губа Летняя (Яндекс.Карты).



Актуальность изучения таких акваторий в рассматриваемой части Кандалакшского залива связана с тем, что на разных стадиях отдаления от моря и в зависимости от сезонных условий внутри каждого водоема может образовываться своя уникальная морская экосистема. В настоящее время эти особенности малоизучены. На примере данной работы показан комплексный подход, который можно применить при изучении других акваторий Кандалакшского залива.

## Глава 2. Океанологические измерения 2017-2023 гг. в районах исследования

Важной частью данной работы является использование натуральных данных (*in situ*), которые были собраны во время проведения летних студенческих практик на Белом море, в ходе выполнения работ по гранту РФФИ № 18-04-01052 «Трехиглая колюшка *Gasterosteus aculeatus* как связующее звено между сообществами открытого моря и побережья Белого моря», гранту РНФ № 19-14-00092, гранту РНФ №22-24-00956 «Обычная, но неизвестная рыба: девятииглая колюшка *Pungitius pungitius* L. Белого и Балтийского морей – популяционные характеристики и роль в экосистеме», а также в рамках инициативного проекта СПбГУ «Проливы Керетского архипелага Белого моря: сезонные особенности водообмена». В работе использовались как океанологические, так и гидробиологические данные.

Массив данных относится к трём вышеперечисленным объектам: лагуна Колюшковая и пролив Сухая Салма, пролив Подпахта с губой Лебяжья, губа Летняя.

Океанологические данные были собраны в период с 2017 года по 2023 год включительно (6 летних, 2 зимних и 1 переходный (осенний) сезоны). Ниже в таб.1 представлено краткое описание этих данных (по годам):

Таблица 2.1. Натурные океанологические эксперименты в некоторых полуизолированных приливных акваториях Кандалакшского залива

год	данные
2017	Суточная станция в проливе Сухая Салма, напротив лагуны Колюшковая (26/06/2017 18:00 – 27/06/2017 18:00) <i>сизигия</i> <u>Измеряемые параметры:</u> <ul style="list-style-type: none"><li>• вертикальные профили температуры, солёности и хлорофилла.</li><li>• скорости и направления течений</li><li>• уровень воды (в проливах Сухая Салма и Средняя Салма)</li></ul>
2018	Суточная станция в проливе Сухая Салма и лагуне Колюшковая

	<p>(24/06/2018 08:00 – 25/06/2018 08:00) <i>квadratura</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальные профили температуры, солёности и хлорофилла.</li> <li>• скорости и направления течений</li> <li>• уровень воды (в проливах Сухая Салма и Средняя Салма)</li> <li>• концентрация растворённого кислорода, минерализация вод, водородный показатель рН</li> </ul> <p>Многочасовая станция в проливе Сухая Салма напротив лагуны Колюшковая</p> <p>(26/07/2018 07:00 – 26/07/2018 19:00) <i>квadratura</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальные профили температуры и солености и хлорофилла.</li> <li>• скорости и направления течений</li> <li>• уровень воды (в проливах Сухая Салма и Средняя Салма);</li> <li>• концентрация растворённого кислорода, минерализация вод, водородный показатель рН</li> </ul>
2019	<p>Многочасовая станция в проливе Сухая Салма напротив лагуны Колюшковая (20/06/2019 06:00 – 22:00) <i>сизигия</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальные профили температуры, солености и хлорофилла;</li> <li>• скорости и направления течений</li> </ul> <p>Многочасовая станция в проливе Сухая Салма напротив лагуны Колюшковая (29/07/2019 10:00 – 12:00) <i>квadratura</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальные профили температуры, солености и хлорофилла.</li> </ul>

2020	<p><b>Зимние</b> измерения в лагуне Колюшковая (20/03/2020 13:00 – 16:40) <i>квadrатура</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры</li> </ul> <p>Зимние измерения в лагуне Колюшковая (21/03/2020 12:00 – 15:30) <i>квadrатура</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры и солёности</li> </ul> <p><b>Летняя</b> многочасовая станция в лагуне Колюшковая и в проливе Сухая Салма (26/08/2020 09:30 – 20:00) <i>квadrатура</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры, солёности и хлорофилла</li> </ul>
2021	<p>Зимние измерения в лагуне Колюшковая, проливе Сухая Салма и устьевой области р. Кереть (11/03/2021 – 14/03/2021) <i>квadrатура</i> → <i>сизигия</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры, солёности и хлорофилла</li> <li>• высота снежного покрова, толщина льда</li> </ul> <p><b>Летние измерения:</b></p> <p>Многочасовые измерения во время <i>квadrатурного</i> прилива (20/06/2021 10:00 – 18:00) и суточная станция во время <i>сизигийного</i> прилива (27/06/2021 12:00 – 28/06/2021 11:00) в лагуне Колюшковая</p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры, солёности и хлорофилла</li> <li>• уровень моря</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• отбор проб на жёлтое вещество (ЖВ) и солёность</li> <li>• измерения скоростей и направления течений</li> <li>• промеры глубин в проливе Сухая Салма (20/06/2021)</li> </ul> <p>Многочасовые измерения в губе Лебяжья (07/08/2021) <i>квадратура</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры, солёности и хлорофилла</li> </ul>
2022	<p>Многочасовые измерения в проливе Сухая Салма и лагуне Колюшковая (20/06/2022 16:00 – 22:30) <i>сизигия</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры, солёности и хлорофилла</li> <li>• измерения скоростей и направления течений</li> </ul> <p>Суточная станция в проливе Подпахта (17/07/2022 17:00 – 18/07/2022 16:00) <i>сизигия</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры, солёности и хлорофилла</li> <li>• измерения скоростей и направления течений</li> <li>• отбор проб на кремний, ЖВ и солёность</li> </ul> <p>Океанологическая съёмка устьевой области р.Кереть на фазе прилива (21/07/2022 18:00 – 20:00) <i>квадратура</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры, солёности и хлорофилла</li> <li>• измерения прозрачности воды</li> <li>• измерения концентрации O<sub>2</sub></li> <li>• отбор проб на кремний, ЖВ и солёность</li> </ul> <p>Океанологическая съёмка губы Летняя и пролива Глубокая Салма в конце прилива - начале отлива (25/07/2022 12:00 – 16:00) <i>квадратура</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры, солёности и хлорофилла</li> <li>• измерения прозрачности воды</li> <li>• измерения концентрации O<sub>2</sub></li> <li>• отбор проб на кремний, ЖВ и солёность</li> </ul> <p>Океанологическая съёмка губы Лебяжья в конце прилива (27/07/2022 14:00 – 16:30) <i>квадратура</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры, солёности и хлорофилла</li> <li>• измерения скоростей и направления течений</li> <li>• измерения прозрачности воды</li> <li>• измерения концентрации O<sub>2</sub></li> <li>• отбор проб на кремний, ЖВ и солёность</li> </ul> <p>Аэрофотосъёмка лагуны Колюшковая на моменте затока вод и полной воде (01/08/2022 17:30-19:30) <i>сизигия</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• на момент затока вод в лагуну: 107 снимков, высота полета 263 м, разрешение съёмки 4.62 см/пикс; цифровая модель местности</li> <li>• - на момент полной воды: 108 снимков, высота полета 264 м, разрешение съёмки 4.63 см/пикс; цифровая модель местности</li> </ul>
2023	<p><b>Зимние измерения</b> в лагуне Колюшковая, губе Лебяжья и устьевой области р.Кереть (14/03/2023 – 16/03/2023) сизигия → <i>квадратура</i></p> <p><u>Измеряемые параметры:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальный профиль температуры, солёности и хлорофилла</li> <li>• высота снежного покрова, толщина льда</li> <li>• измерение концентрации хлорофилла с помощью фильтрации морской воды</li> <li>• измерение желтого вещества</li> <li>• отбор проб на фитопланктон</li> <li>• измерение концентрации биогенных элементов</li> </ul>

В ходе многолетних исследований в разные сезоны года формат натуральных экспериментов (**океанологические станции, разрезы, съёмки**) подбирался под те или иные особенности гидрологического, приливного и гидробиологического режима. Так, многочасовые измерения были важны для изучения частично отделившихся полуизолированных приливных акваторий с целью определения возможности затока и момента затока морских вод. Результаты океанологической съёмки позволили оценить пространственное распределение гидрофизических параметров (прежде всего температуры, солёности и плотности для конкретной фазы прилива). Также большой интерес представляет смешение разнородных вод при участии приливных процессов, ввиду того, что часть изучаемых объектов лежит в пределах устьевой области р. Кереть.

Начало изучения одной полуизолированной приливной акватории (лагуна Колюшковая – пролив Сухая салма) началось в 2017 и 2018 годах, когда были проведены многочасовые океанологические измерения уровня, температуры, солёности и др. характеристик в разные циклы (сизигия и квадратура) приблизительно в одни и те же даты (20-е числа июня), когда уже воды достаточно прогреты и на Белом море уже наступил летний сезон. Также в 2018 году были проведены измерения, относящиеся ко второй половине лета, когда тёплый сезон близок к завершению. В 2019 году были проведены схожие наблюдения, что и в 2017г. (20-е числа июня, сизигия), а также измерения во время квадратуры, в конце июля. В 2020 году были проведены первые зимние наблюдения в лагуне, а также многочасовые измерения в конце августа. В 2021 году были проведены измерения во время разных типов прилива (квадратура и сизигия) в те же самые даты, что в 2017-2019гг. Кроме того, были проведены измерения в начале августа в губе Лебяжья во время прилива и отлива. В 2022г. были более обширные измерения: многочасовые измерения в лагуне Колюшковая во время сизигийного прилива, океанологическая съёмка в губе Лебяжья, Амазоне и губе Летняя в разные дни. В марте 2023 года были проведены комплексные океанологические исследования большей части устьевой области р.Кереть, в программу которых были включены измерения уровня снега и льда, определение концентрации хлорофилла в воде и льде, концентрации желтого вещества, анализ вод на фитопланктон.

Для океанологических измерений использовались следующие приборы:

- Многопараметрический автоматический зонд YSI 6600 V2-03(рис. 2.1) фирмы YSI Incorporated (для измерений летних сезонов 2017-2018 гг.). Фиксируемые параметры: температура, электропроводность, общая минерализация, глубина (давление), рН, Eh, растворенный кислород, мутность, хлорофилл, аммоний, нитраты, хлориды.

- Многопараметрический зонд OCEAN SEVEN 316Plus CTD (рис. 2.2) (для измерений летних и зимних сезонов 2019 – 2023 гг.). Фиксируемые параметры: температура, электропроводность (соленость), глубина (давление), хлорофилл.



Рис. 2.1. Зонд YSI 6600 V2-03 (Xylem Analytics). Рис. 2.2. Зонд OCEAN SEVEN 316PlusCTD.

Отделяясь от суши, акватории начинают постепенно становиться полуизолированными, т.е. заток вод в них из мористой части происходит с некоторой частотой (например, во время каждого прилива или только во время высокого (сизигийного) прилива). Было установлено, что лагуна Колюшковая соединяется с морем лишь во время сизигийного прилива, при высокой полной воде (ВПВ). Для определения данного факта были проведены многократные измерения уровня моря с помощью деревянной мерной рейки. Расположение рейки – у острова Средний рядом с местом проведения метеоизмерений. Цена деления данной шкалы на рейке – 10 см. Общая высота рейки – 230 см. Во время кратковременных полевых измерений используется другая деревянная мерная рейка с такой же ценой деления и высотой 200 см. Данная рейка устанавливалась внутри лагуны Колюшковая вблизи берега для определения изменения уровня воды в разные фазы прилива.





Рис. 2.3. Работы по измерению уровня воды и STD-зондированию в лагуне Колюшковая (20/06/2022).

Кроме STD-зонда и рейки использовались и другие приборы:

- Диск Секки – для измерения прозрачности воды (рис. 2.4)
- Вектор-2 – автономный измеритель течений (рис. 2.4)
- Оксиметр DO-100 – измерение концентрации кислорода в воде (рис. 2.5)
- GPS-навигатор



Рис. 2.4. Диск Секки (фото от 21/07/2022) (слева) и автономный измеритель течений «Вектор-2» (фото от 20/06/2022) (справа).



Рис. 2.5. Оксиметр DO-100 (фото от 17/03/2023).

Во время многочасовых измерений (океанологических станций) использовались также батометры (рис. 2.6) для отбора проб воды с глубинных горизонтов, а также для измерения температуры воды.



Рис. 2.6. Батометр Нансена БМ-48 с установленными глубоководными термометрами (фото от 23/06/2022).

Взятые пробы воды обрабатывались в гидрохимической лаборатории, расположенной на территории базы СПбГУ на о.Средний.

Для работ на море и передвижения по воде использовались следующие плавсредства:

- Одноместная резиновая лодка без мотора (измерения внутри лагуны) (рис. 2.3)
- Гребная лодка «Пелла» (рис. 2.7)
- Спасательная шлюпка SAMFROST (рис. 2.8)

- Моторная лодка НЕРПА (рис. 2.9)



Рис. 2.7. Гребная лодка «Пэлла»

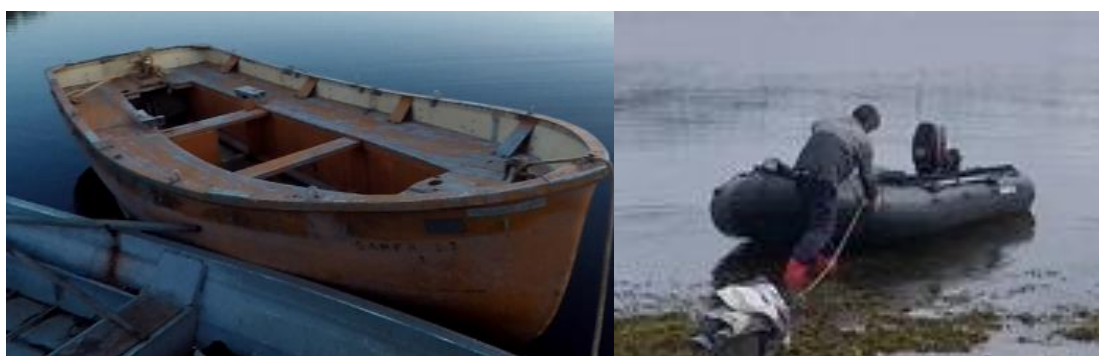


Рис. 2.8. Спасательная шлюпка SAMFROST

Рис. 2.9. Моторная лодка НЕРПА

Определение мест и времени измерений для какого-либо конкретного сезона выбиралось исходя из количества измерений, текущей погоды и приливного режима. Например, измерения в лагуне Колюшковая проводились приблизительно в одни и те же даты в разные сезоны (вторая половина июня), так как даты измерения были привязаны к конкретным приливным условиям. Благодаря этому, удалось обнаружить разницу между структурой вод в летний сезон за различные годы. Океанологические съемки проводились в достаточно разное время, так как они зависят от большего количества факторов. Поэтому из всего массива данных, собранных в ходе указанных годов, были выбраны только некоторые съемки, подходящие под тему данной работы.

Другой набор данных, используемых в данной работе – **гидробиологическая информация**. В работе используются данные по лагуне Колюшковая и проливу Сухая Салма (напротив данной лагуны), а также по губе Летняя. В частности, по лагуне Колюшковая, которая является полуизолированным приливным водоёмом, находящимся на 2-й стадии отделения от моря, есть обширный научный материал, так как гидробиологические исследования в данном водоёме проводятся с 2009 года. Лагуна Колюшковая активно посещается трехиглой колюшкой (*Gasterosteus aculeatus*), которая является важной частью местной морской экосистемы (Лайус и др, 2013).

Гидробиологические исследования включали в себя следующие измерения:

- изучение количественного и видового разнообразия макрозообентоса, зоопланктона и рыб в лагуне и мористой части напротив лагуны Колюшковая;
- питание трехиглой колюшки;
- изучение зимовки рыб внутри лагуны;
- изменение температуры подповерхностного слоя воды с помощью датчика температуры на глубине 0,5 м.

По системе пролив Подпахта-губа Лебяжья привлечены литературные источники, описывающие результаты работ прежних лет.

По губе Летняя (которая находится на начальной стадии отделения от моря) предоставлены данные лишь за летний сезон 2001 года. Донные пробы были отобраны с помощью батометра и дночерпателя (исследование придонного слоя и бентоса). Всего было сделано 7 станций. На каждой станции были определены:

- общая биомасса ( $\text{мг}/\text{м}^2$ );
- общая численность ( $\text{экз}/\text{м}^2$ );
- индекс Шеннона по биомассе и по численности, определяющий биоразнообразие;
- солёность и температура придонного слоя воды;
- температур воды на отдельных горизонтах;
- водородный показатель pH;
- окислительно-восстановительный потенциал Eh;
- содержание органики (древесных остатков).

Как правило, отбор донных проб и отлов нектона происходил с середины мая по начало сентября. Данные сроки позволяют оценить нерест у основного субъекта исследования гидробиологов – трехиглой колюшки, который длится с мая по июнь, и сделать прогноз на зимовку рыб, поскольку те рыбы, которые попали в лагуну в конце лета и осенью, с большой долей вероятности остаются там на зиму. Гидробиологические работы в лагуне Колюшковая не всегда были приурочены к фазам прилива, поскольку основная задача состояла в оценке количественного и возрастного состава гидробионтов непосредственно в лагуне и в прилегающем морском проливе (Сухая Салма) в условиях нестационарного водообмена, т.е. периодического соединения лагуны с морем (во время сизигийных приливов). Например, в экспериментальных целях была сооружена каменная перемычка (рис.2.10), благодаря которой место соединения лагуны и моря сузилось до небольшого пролива. Там был установлен лоток для подсчёта количества рыб, проходящих в лагуну из моря и обратно.



Рис. 2.10. Каменная перемычка, созданная вручную для упрощения определения количественного состава трехиглой колюшки (*Gasterosteus Aculeatus*) в лагуне. (свободный проход для колюшки находится в дальней части фотографии) (фото от 20/06/2022).

## Глава 3. Термохалинный режим полуизолированных приливных акваторий Кандалакшского залива Белого моря

### 3.1. Лагуна Колюшковая (с проливом Сухая Салма)

Лагуна Колюшковая, имеющая водообмен с проливом Сухая Салма, в данной работе рассматривается как полуизолированная приливная акватория, находящаяся на 2-й стадии превращения морского водоёма в озеро.

Пролив Сухая Салма имеет вытянутую с юго-запада на северо-восток воронкообразную форму, заканчивающийся смыканием двух островов – Большой Горелый (далее – Бол.Горелый) и Кереть. Другими словами, данный пролив является фактически заливом с большой частью мелководья в северо-восточной части. Лишь при полных водах узкое пространство между двумя островами заливается водой, и залив становится проливом. Большую часть времени это место осушено, отсюда и название «Сухая Салма». На северном берегу Сухой Салмы в остров Бол.Горелый вдаётся небольшой залив, который в данной работе назван «лагуна Колюшковая», которая является полуизолированной приливной акваторией. От пролива Сухая Салма лагуну отделяет островок, окружённый широкой каменистой отмелью (Рис.3.1):

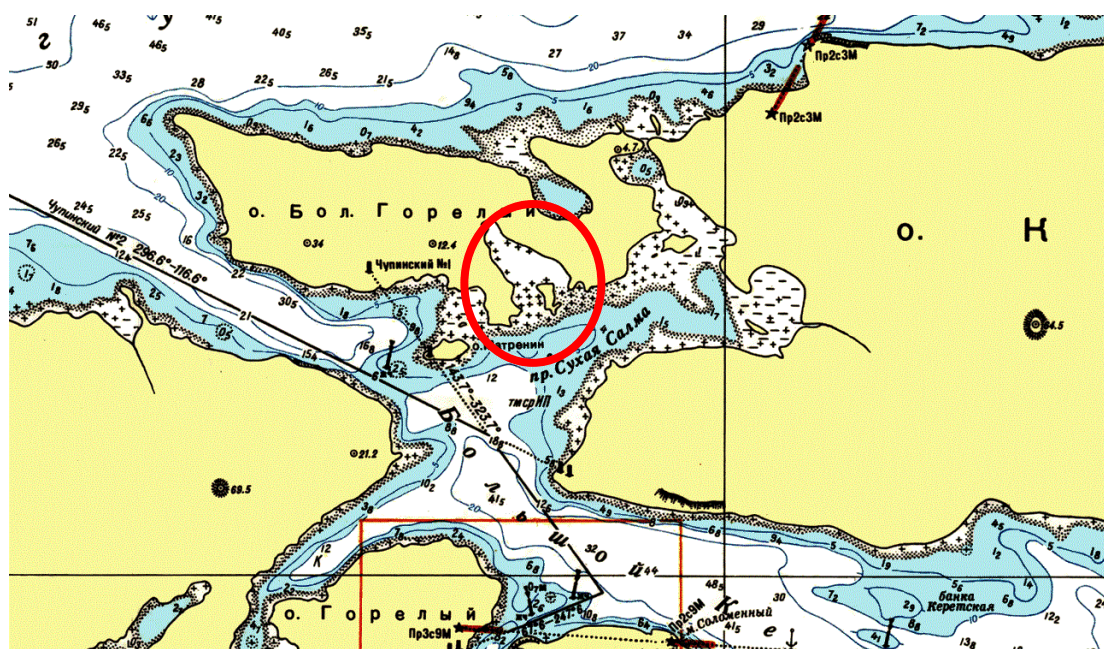


Рис. 3.1. Фрагмент навигационной карты «Подходы к губам Чупа и Кереть, Кандалакшский залив, Белое море», 1989 г. Лагуна обозначена красным кругом.

В Сухой Салме привычны приливные колебания уровня моря, но в лагуне Колюшковая действие прилива сказывается опосредованно, а наблюдаемый заток воды происходит нерегулярно. Предположительно, это должно происходить во время высокого подъема вод в мористой части (Сухая Салма).

Исследования океанологического режима этих смежных акваторий начались летом 2017 г. и продолжились в разных сезонах последующих лет. В первую очередь, были выполнены эксперименты по изучению колебаний уровня моря, как в лагуне, так и в Сухой Салме. В июне 2017 г. был измерен ход уровня в лагуне Колюшковой, а летом 2018 г. проводились синхронные измерения, которые сравнивались с уровенными наблюдениями, организованными на о.Средний (губа Кереть, пролив Средняя Салма). Измерения уровня были приурочены к тем или иным астрономическим условиям, определяющим интенсивность проявления приливных процессов в этой части Белого моря.

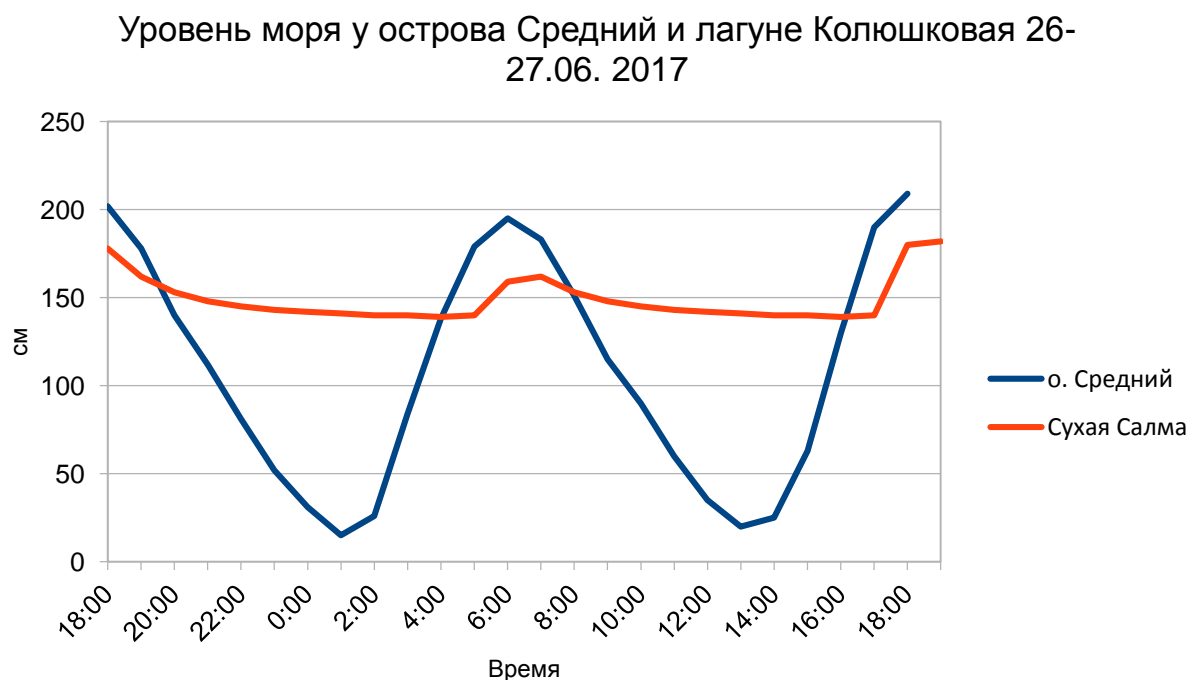


Рис. 3.2. Уровень моря у о. Средний и лагуны Колюшковая, 26-27.06.2017, сизигия.

На рис.3.2 видно, что колебания уровня моря в лагуне Колюшковая связаны с сизигийным приливом, но имеют меньшую амплитуду и небольшой временной сдвиг. Видна асимметрия прилива и отлива, а запаздывание максимального уровня воды составляет примерно 1 час. Безусловно, такой характер колебаний уровня связан с тем, что лагуна Колюшковая фактически отделена от моря и имеет водообмен с ней лишь при определённых приливных условиях.

В июне 2018 г. были проведены одновременные измерения уровня: снова в лагуне Колюшковая, а также на внешней (мористой) части - в проливе Сухая Салма. Эксперимент проводился на этот раз в условиях квадратурного прилива.

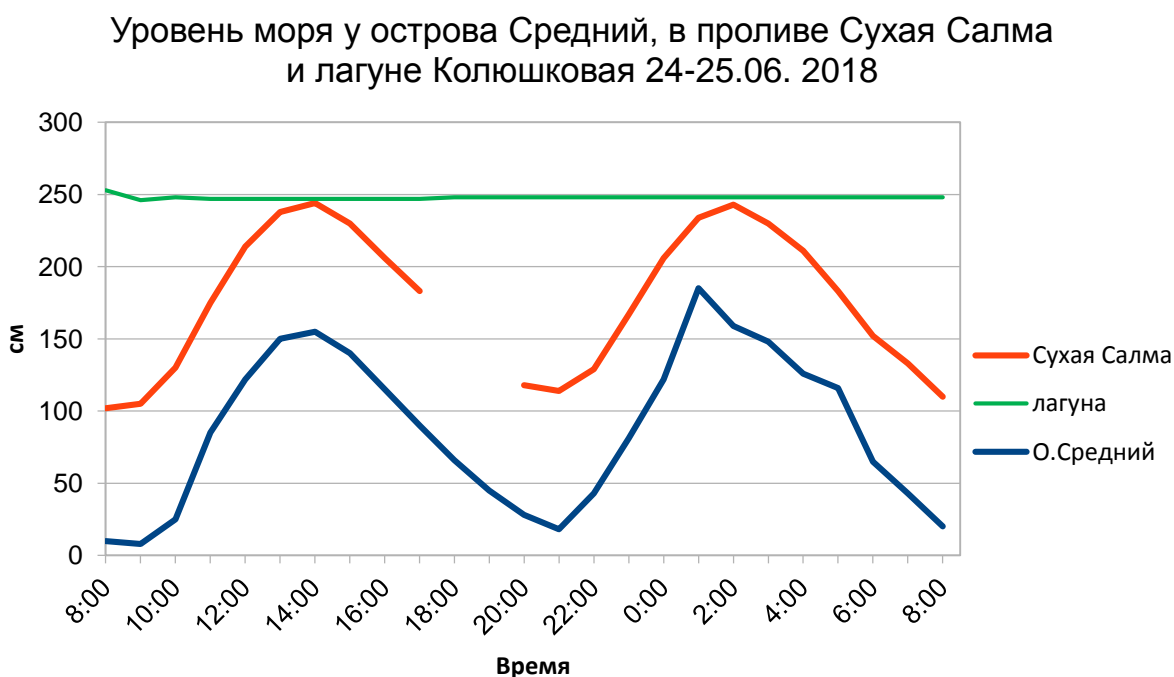


Рис. 3.3. Уровень моря у о. Средний, в лагуне Колюшковая и проливе Сухая Салма, 24-25.06.2018, квадратура.

Из рис.3.3. видно, что время наступления полных и малых вод в Средней и Сухой Салме совпадают, а ход уровня колеблется синхронно. То есть для сравнения изменения уровня воды в лагуне с мористой частью можно использовать измерения у о. Средний. Коэффициент корреляции составляет 0,98. В это же самое время уровень моря в лагуне Колюшковая практически изменился за период наблюдений. Таким образом, было установлено, что заток вод в лагуну при квадратуре не происходит, и он возможен при иных приливных условиях.



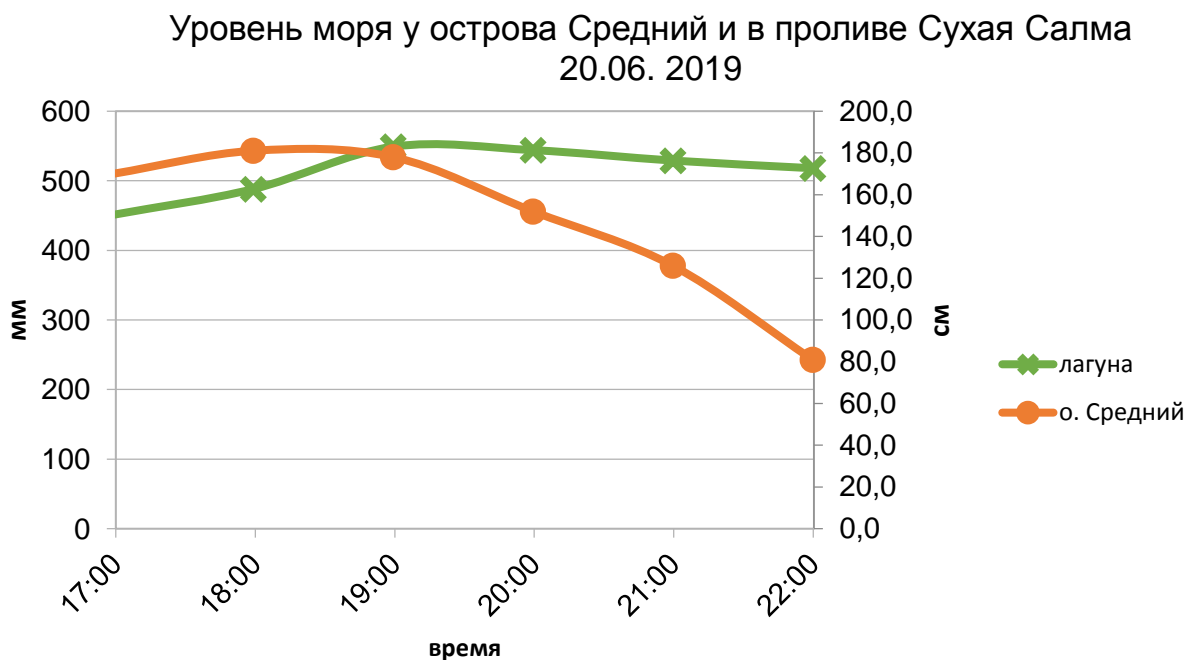


Рис. 3.4. Уровень моря у о. Средний и лагуны Колюшковая, 20.06.2019, сизигия.

В июне 2019г. была предпринята многочасовая станция в проливе Сухая Салма и лагуны Колюшковая, результаты которой подтвердили, что во время сизигийного прилива заток вод в лагуну происходит, а максимум достигается на начале фазы отлива на мористой части: приблизительно через 1 час после наступления полной воды. Полная вода 20.06.2019г. была зафиксирована около 18:20, а максимальный уровень воды в лагуны Колюшковой – в период 19:10-19:20. (Рис.3.4).

В сезоне 2020г. наблюдения за уровнем моря не проводились.

В июне 2021г. в проливе Сухая Салма и лагуны Колюшковая было организовано сразу два эксперимента – в квадратурный прилив (20.06) и сизигийный прилив (27-28.06). Выяснилось, что во время квадратурного прилива заточка не произошло и уровень моря в лагуны не изменился (рис.3.5). При сизигии, в полную воду, ожидаемый заток морских вод в лагун случился - когда уровень моря достиг 177 см по рейке (максимум, пришедшийся на высокую полную воду (ВПВ)). При низкой полной воде (НПВ) заточка не произошло, так как уровень воды достиг меньшей величины, на 20 см меньше (157 см). Таким образом, было уточнено, что заток морских вод в лагуну Колюшковую может произойти только при сизигии, и лишь при достижении высокой полной воды (ВПВ) на внешней (морской) части.

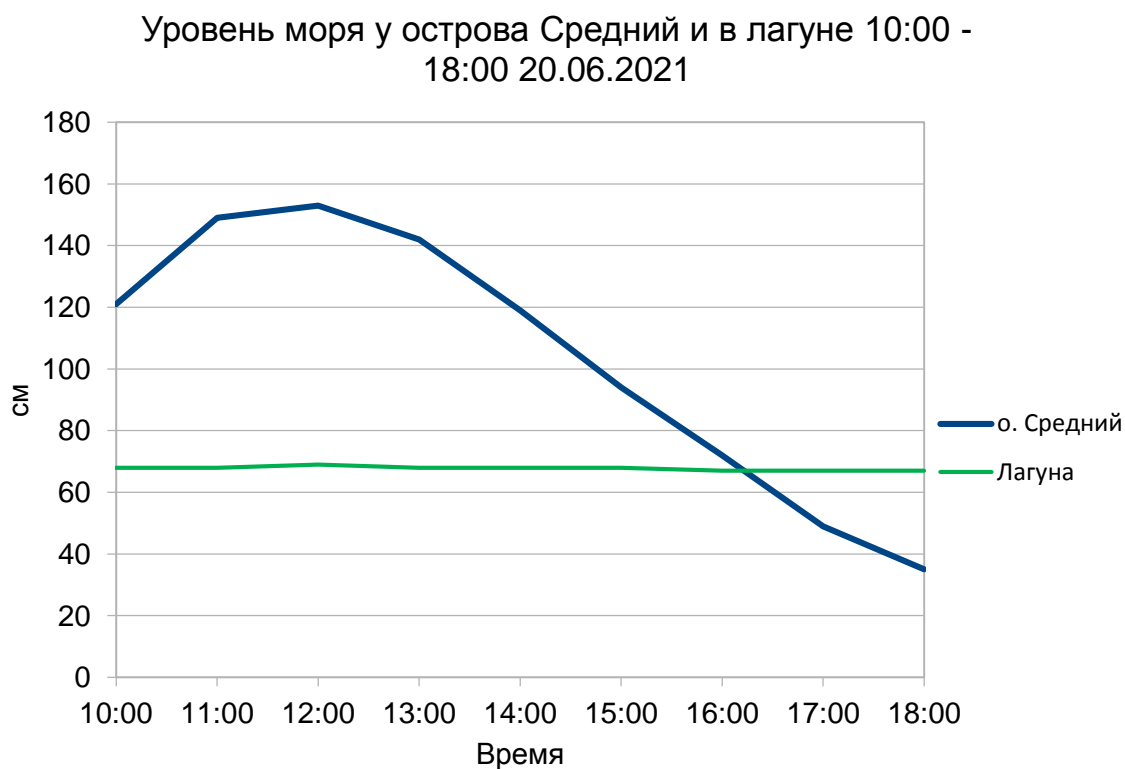


Рис. 3.5. Уровень моря у о. Средний и лагуны, 20.06.2021, квадратура.

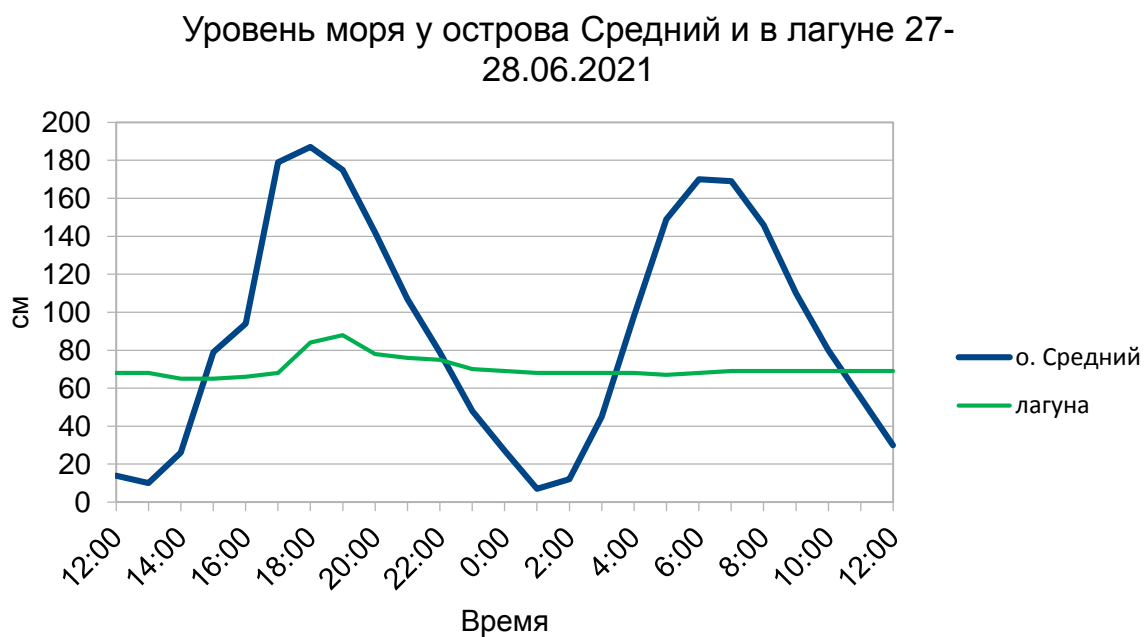


Рис. 3.6. Уровень моря у о. Средний и в лагуне, 27-28.06.2021.

В июне 2022г. для подтверждения данной гипотезы, были проведён новый эксперимент, который был устроен именно во время сизигийного прилива, в условиях наступления высокой полной воды (рис.3.7). Дискретность наблюдений отличалась от

предыдущих (ранее они выполнялись ежечасно) и измерения были учащены: 1 раз в 30 мин, а в момент затока и при затоке вод в лагуну – 1 раз в 10 мин. Ожидавшийся сизигийный заток морских вод случился и подробный ход уровня представлен на рис.3.7:



Рис. 3.7. Уровень моря у о. Средний и в лагуне, 16:00 – 23:00 20.06.2022, сизигия.

Таким образом, в ходе полевых работ было установлено, что явный заток морских вод в лагуну Колюшковая происходит лишь периодически, редко, только при сизигии, при высоких полных водах (ВПВ). За счёт этого, в лагуне создаются специфические термохалинные условия, заметно отличающиеся от морской акватории (пролив Сухая Салма).

Также во второй половине лета в 2022 году была проведена аэрофотосъемка лагуны с помощью БПЛА. Всего было сделано две съемки: на момент затока вод в лагуну и момент полной воды. В результате обработки 107 и 108 снимков соответственно было сделано две цифровых модели местности и два снимка (рис. 3.8).

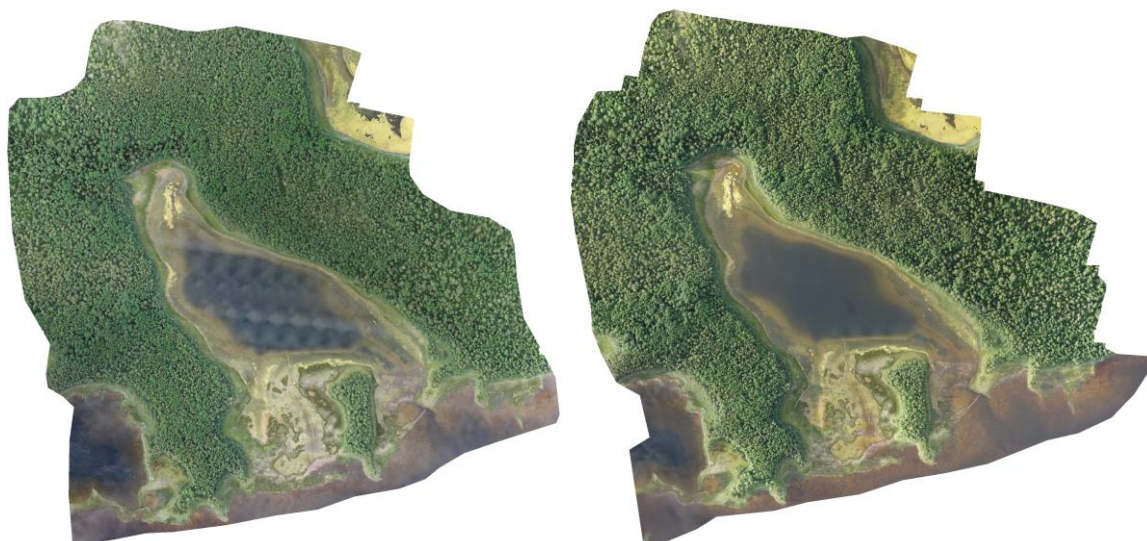


Рис. 3.8. Обработанные снимки лагуны Колюшковая, 01/08/2022, момент затока воды (слева) и момент полной воды (справа).

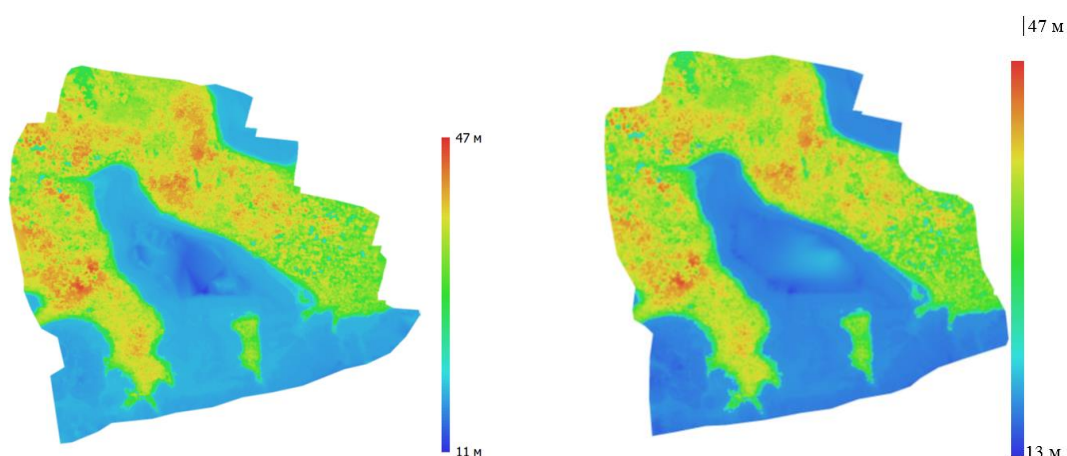


Рис. 3.9. Цифровая модель лагуны Колюшковая, 01/08/2022, момент затока воды (слева) и момент полной воды (справа).

Особый термохалинный режим полуизолированных приливных акваторий наиболее наглядно проявился на примере системы Лагуна Колюшковая – пролив Сухая Салма. Нерегулярные затоки морской воды в лагуну создают специфические гидрологические условия, которые оказывают влияние на динамику морской экосистемы, в частности на численность трёхиглой колюшки (*Gasterosteus aculeatus*).

В ходе многочасовых океанологических измерений (главным образом, в тёплое время года) были выявлены особенности изменчивости основных характеристик (температура, солёность) в лагуне Колюшковая.

На рис.3.10 видно, что повышение уровня моря в лагуне (27.06.2017), произошедшее при сизигийном приливе, обусловило заток морских вод из Сухой Салмы (рис. 3.10,3.11)

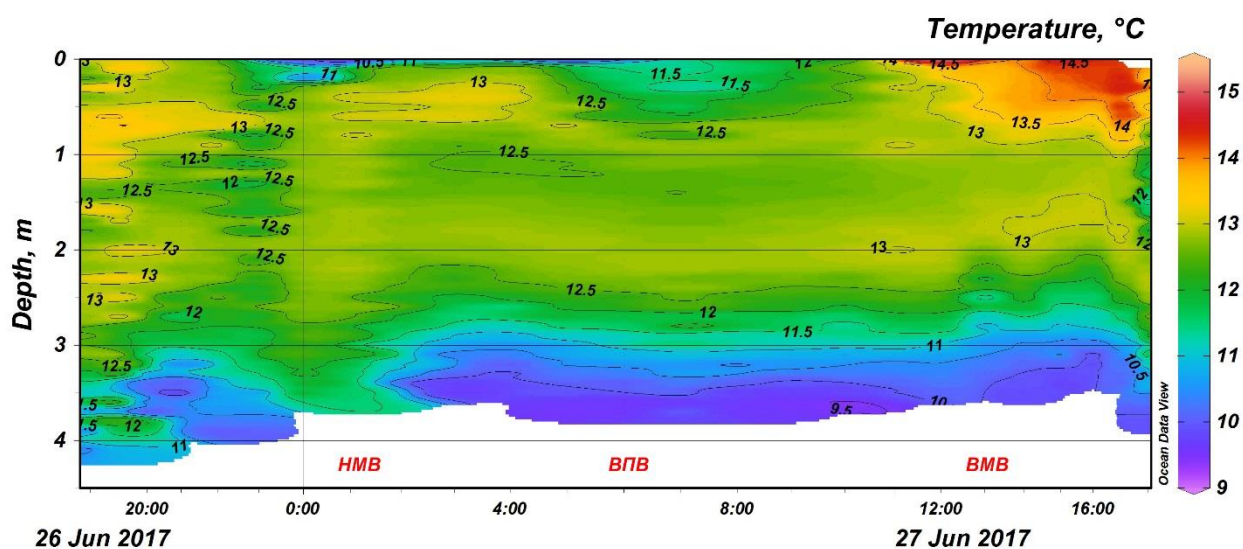


Рис. 3.10. Временная изменчивость температуры воды, Лагуна Колюшковая, 26-27.06.2017.

Из рис. 3.10 видно, что наибольшие температуры (13-14°C) в поверхностном слое наблюдались в период 12:00 – 16:00, что связано с притоком солнечной радиации в дневное время. В ночные часы наблюдалось выхолаживание, и температура воды понижалась до 9°C. В целом, воды в лагуне стратифицированы, прогретые воды (12-13°C) занимают почти всю толщу. В придонном слое температура воды несколько ниже и колеблется в пределах 10-11°C). Такое термическое расслоение вод в лагуне Колюшковая характерно для конца весны - начала лета, при отсутствии затоков морской воды.

Очередной заток вод из пролива Сухой Салмы пришёлся ко времени высокой полной воды (ВПВ) при сизигийном приливе (27.06.2017) и это удалось зафиксировать в конце суточной станции. В лагуну стали поступать порции «инородной» воды, которая оказалась более тёплой (14-15°C), и она стала занимать верхний слой.

Суточный ход солёности, суточная станция в Сухой Салме, 26-27.06.17

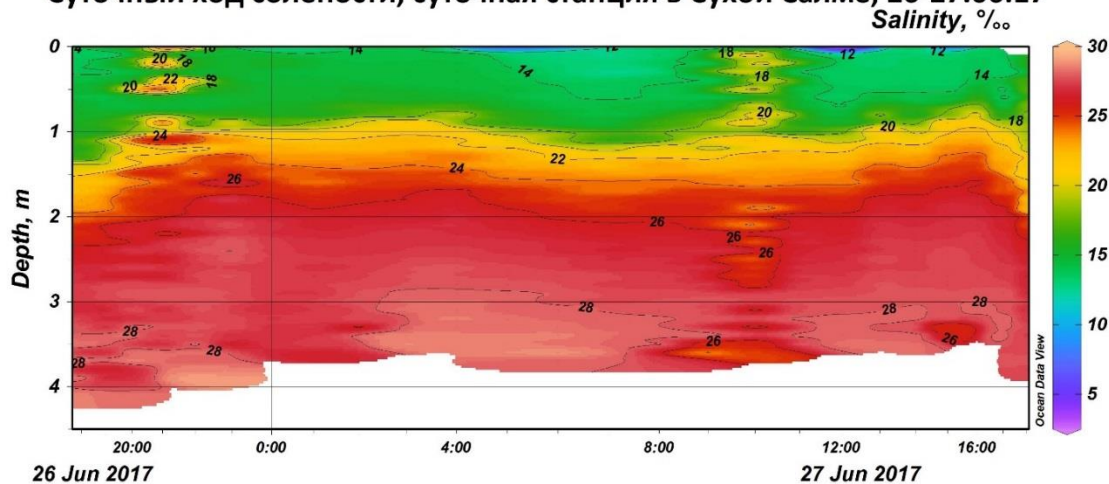


Рис. 3.11. Временная изменчивость солёности [‰] воды, Лагуна Колюшковая, 26-27.06.2017.

Распределение солёности в лагуне Колюшковая во многом оказалось похоже на поле температуры. Верхний (до 1-1,5м), распреснённый (от 13-14 до 19-20 ‰) слой, глубже слой скачка солёности и далее до дна солёные воды (24-26 ‰). Распреснение в поверхностном слое также обнаружилось ко времени затока морских вод.

В ходе летнего сезона 2018г. океанологические измерения в системе лагуна Колюшковая – пролив Сухая Салма были проведены в начале (июнь) и конце (июль) беломорского лета. В проливе Сухая Салма в начале лета верхний слой начинает постепенно прогреваться (до 10-12°C), а на глубинах воды ещё холодны (рис.3.12).

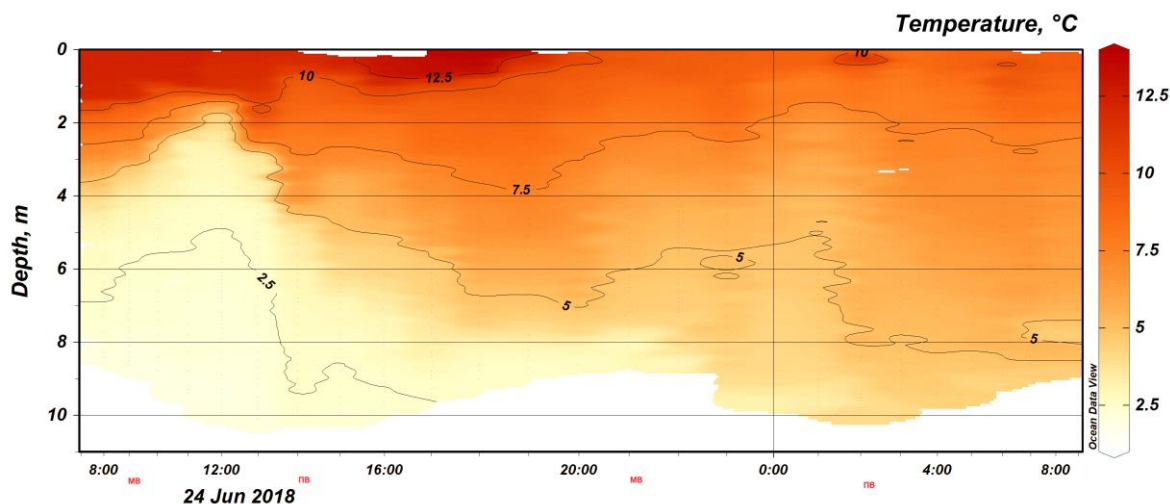


Рис. 3.12. Временная изменчивость температуры [°C] воды, пролив Сухая Салма, 24-25.06.2018.

Однако в Лагуне Колюшковая, вследствие её полуизолированного положения, прогрев идёт намного интенсивнее и температура в верхнем 1-1,5-метровом слое достигает 15-16°C (Рис.3.13). Однако, из-за очередного затока морских вод распределение температуры в этом слое может меняться.

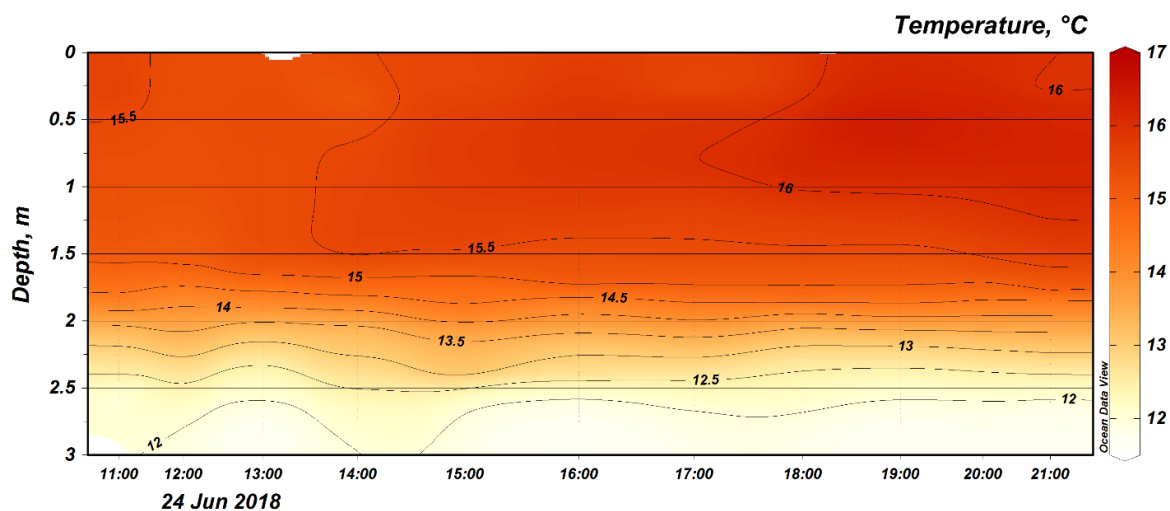


Рис. 3.13. Временная изменчивость температуры [°C] воды, лагуна Колюшковая, 24-25.06.2018.

Схожая картина наблюдается и поле солёности. В начале гидрологического лета, из-за увеличенного пресного стока (река Кереть) в пролив Сухая Салма частично проникают распреснённые воды, но распреснение характерно только для поверхности, где значения солёности колеблются в пределах 16-20 ‰. С глубиной солёность постепенно растёт, достигая 22-24 ‰, а иногда и выше. На ход солёности оказывает влияние приливы, изменяя её значения в зависимости от приливной фазы (рис.3.14)

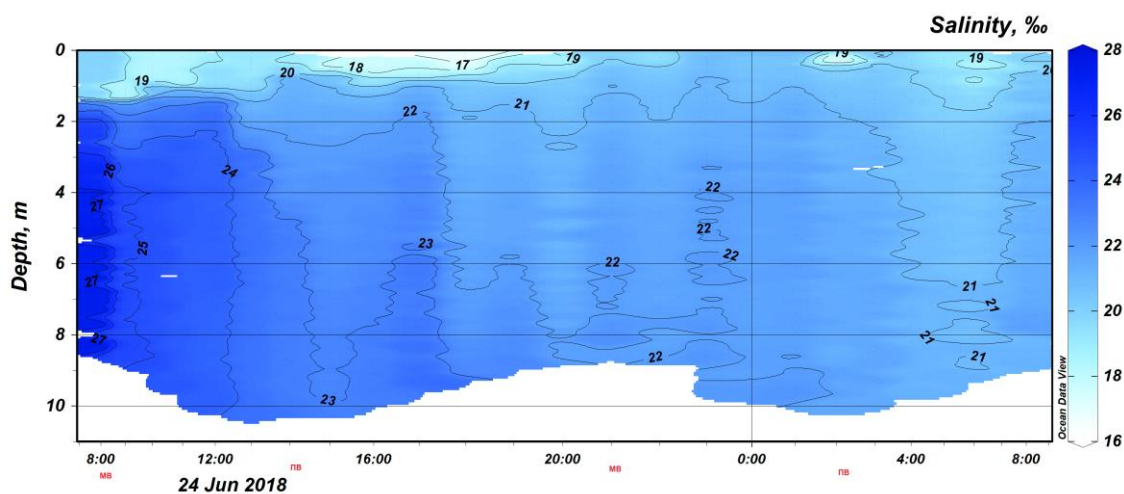


Рис.3.14. Временная изменчивость солёности [‰], пролив Сухая Салма, 24-25.06.2018.

В то же самое время, в лагуне Колюшковая наблюдается чёткое расслоение воды по солёности. В верхнем (1-1,5 м) слое располагаются однородные солёные воды (около 24 ‰); вероятно они остались здесь от предыдущего затока. В придонном слое наблюдаются ещё более солёные воды (24-26 ‰). Распреснение в лагуне отсутствует, поскольку на момент измерений был квадратурный прилив и затока вод не происходило. (рис.3.15):

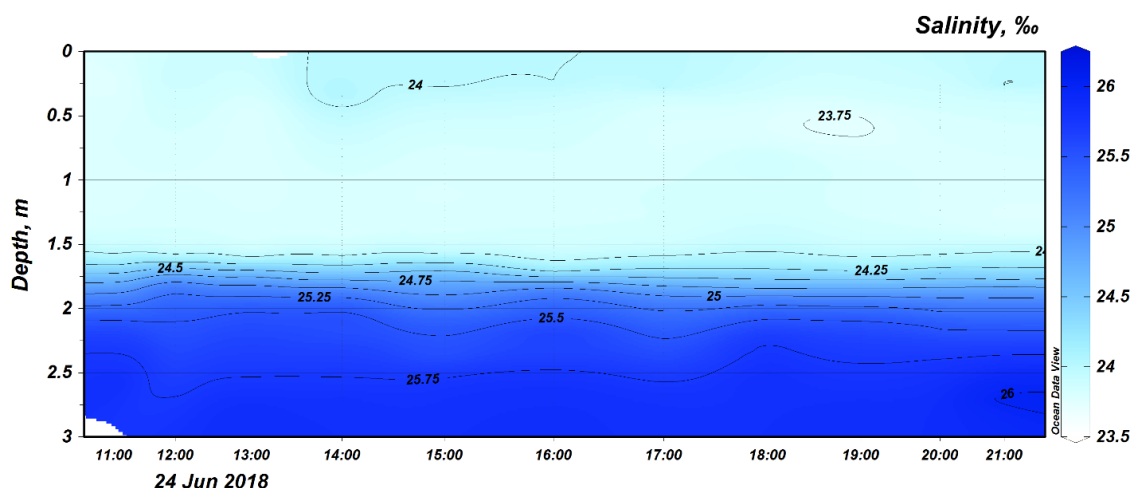


Рис. 3.15. Временная изменчивость солёности [‰], лагуна Колюшковая, 24.06.2018.

Можно считать, что солёность вод в лагуне Колюшковая в начале гидрологического лета (2-я половина июня) гораздо больше (23.5 - 26‰) солёности вод пролива Сухая Салма (17-23‰). Поле солёности на открытой акватории (Сухая Салма) подвержено изменчивости из-за приливов и поступления порций речной воды. В лагуне поле солёности сформируется и сохраняется от затока к затоку, сказывается также небольшая глубина и замкнутость водоёма. Схожая ситуация происходит и с полем температуры воды. За счёт специфических условий воды лагуны между затоками морских вод успевают хорошо прогреться. Таким образом, в начале летнего сезона в лагуне Колюшковая создаются более благоприятные условия для жизнедеятельности гидробионтов по сравнению с морем.

Вследствие полуизолированного положения и при отсутствии затока морских вод в середине и конце летнего сезона воды в лагуне могут прогреваться ещё сильнее (до 24-25°C), причём тепло распространяется по вертикали. Лишь в придонном слое температура воды понижается до 18-19°C. Слой скачка температуры располагается на горизонте 2 м. (Рис.3.16). «Перегретые» воды, в свою очередь, могут создавать экстремальные термические условия для популяций рыб. Впрочем, к этому времени года нерест и нагул рыб закончен, и при затоках молодь рыб отправляется в море.



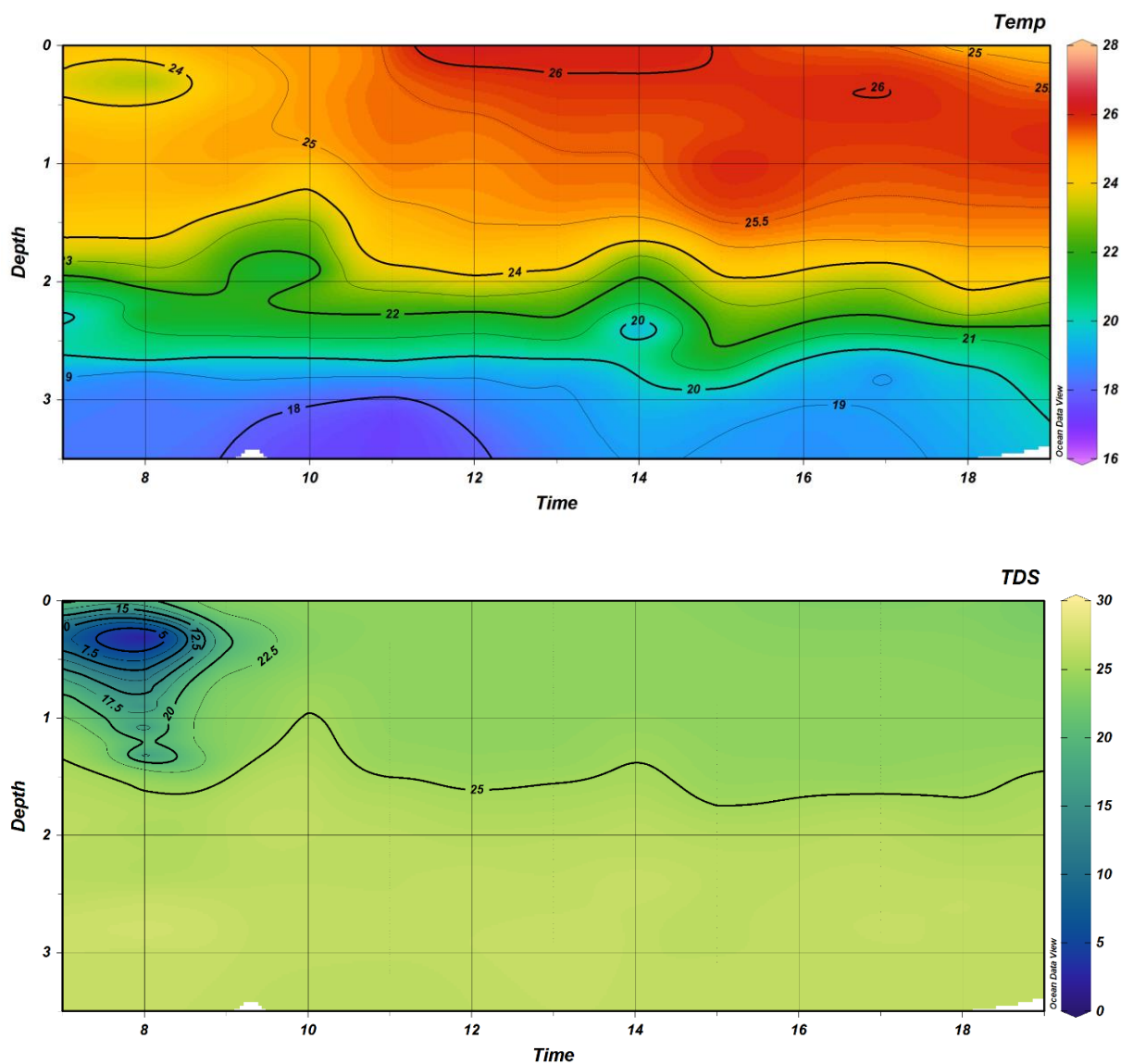


Рис. 3.16. Временная изменчивость температуры [°C] (сверху) и солености [‰] (снизу) в лагуне Колюшковая, 07:00 – 19:00 26.07.2018. квадратура.

В поле солёности в данное время года и при отсутствии затоков наблюдается однородность. Соленость во всей толще держится в районе 25‰.

Вследствие таких условий, в верхнем слое лагуны Колюшковая может наблюдаться недонасыщение вод растворённым кислородом. Но с глубиной его концентрация и насыщение несколько возрастает. Гипоксийные условия, однако, не успевают сформироваться из-за периодического поступления морских вод во время сизигийных затоков (Рис. 3.17).

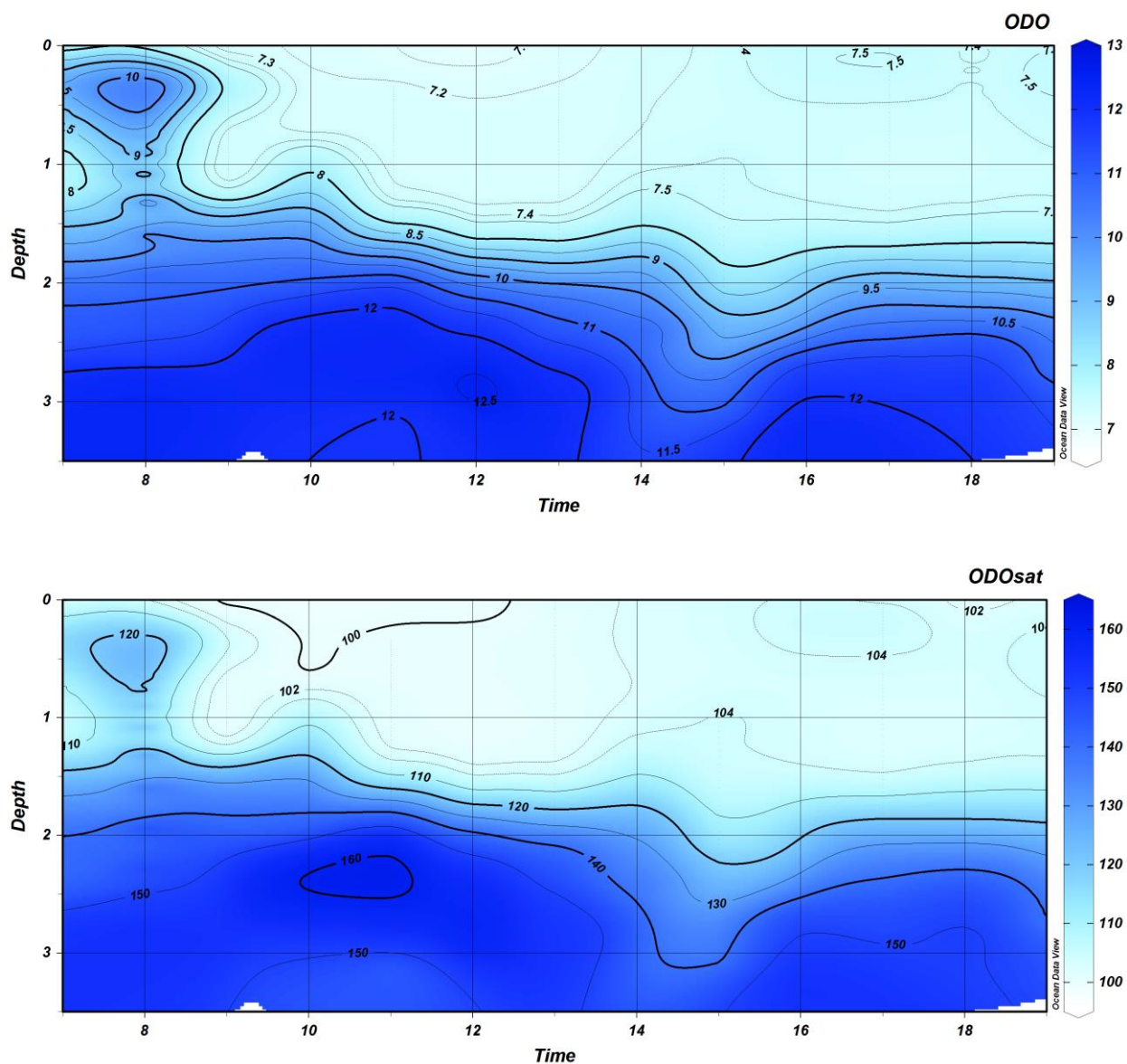


Рис. 3.17. Временная изменчивость растворенного кислорода [мг/л] (сверху) и насыщения кислородом [%] (снизу) в лагуне Колюшковая, 07:00 – 19:00 26.07.2018. *квадратура* .

В следующем, летнем сезоне 2019г. измерения в лагуне Колюшковая и проливе Сухая Салма были проведены во время сизигийного прилива, для обнаружения особенностей изменения основных океанологических характеристик непосредственно во время затока вод.

Результаты измерений, проводившихся на фазе отлива, показали, что воды в проливе Сухая Салма хорошо прогреваются в солнечную погоду. Толщина относительно тёплого слоя (больше 6.5°C) увеличивается, её максимум достигается ко времени наступления малой воды, но в прилив она снова уменьшается. Причём изгиб изотерм наиболее выражен в слое скачка температуры (3-4 м) (Рис. 3.18)

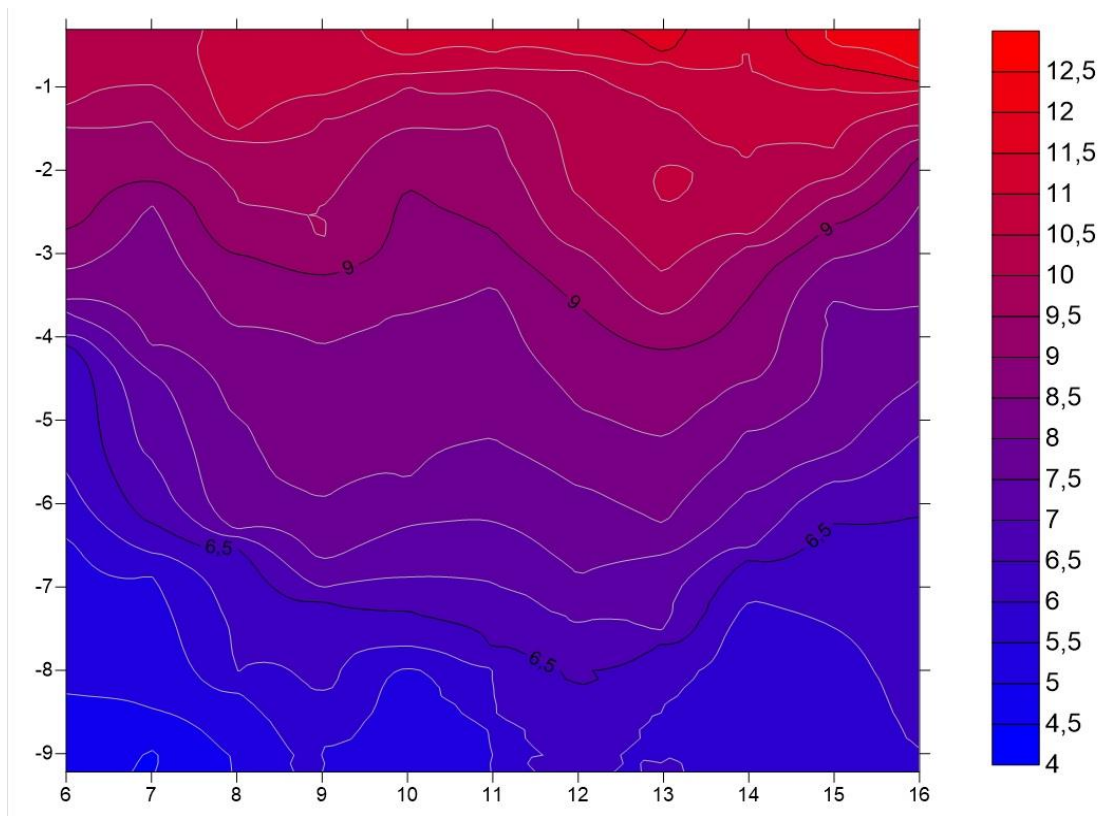


Рис. 3.18. Временная изменчивость температуры [°C] воды, пролив Сухая Салма, 06:00 – 16:00 20.06.2019. сизигия.

С началом прилива измерения переместились в лагуну Колюшковая. Ожидавшийся заток морских вод случился около 19:30 (4-й час прилива). До этого момента времени толща вод была стратифицирована имели одну стратификацию, но после начала затока прогретый верхний слой стал уменьшаться, а слой с более холодной водой ( $<16^{\circ}\text{C}$ ) - увеличиваться. Это произошло за счёт медленного затекания более холодных морских вод в лагуну (Рис. 3.19).

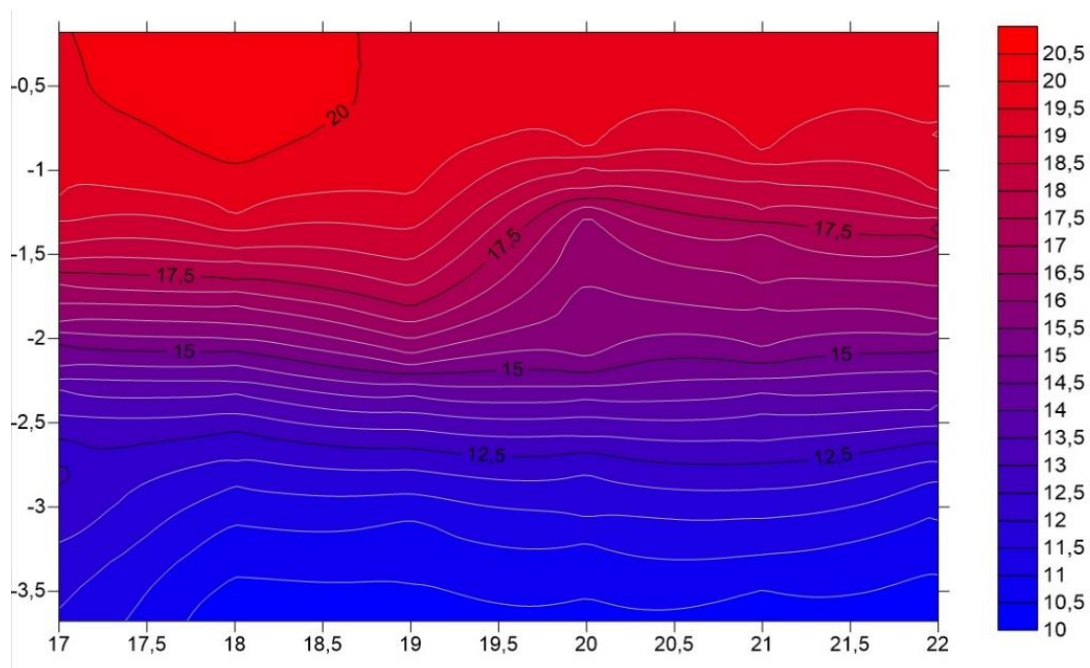


Рис. 3.19. Временная изменчивость температуры [°C] воды, лагуна Колюшковая, 17:00 – 22:00 20.06.2019. *сизигия*.

Ход солёности в Сухой Салме (рис. 3.20) показал, что с наступлением прилива в верхнем слое появились воды с солёностью 22-23‰, которые по мере развития прилива стали затекать в лагуну. До затока в лагуне наблюдалась двуслойная структура: верхний слой с солёностью 20-22‰ и глубинный (от 1 м и до дна) – солёностью больше 23-24‰. (Рис. 3.21)

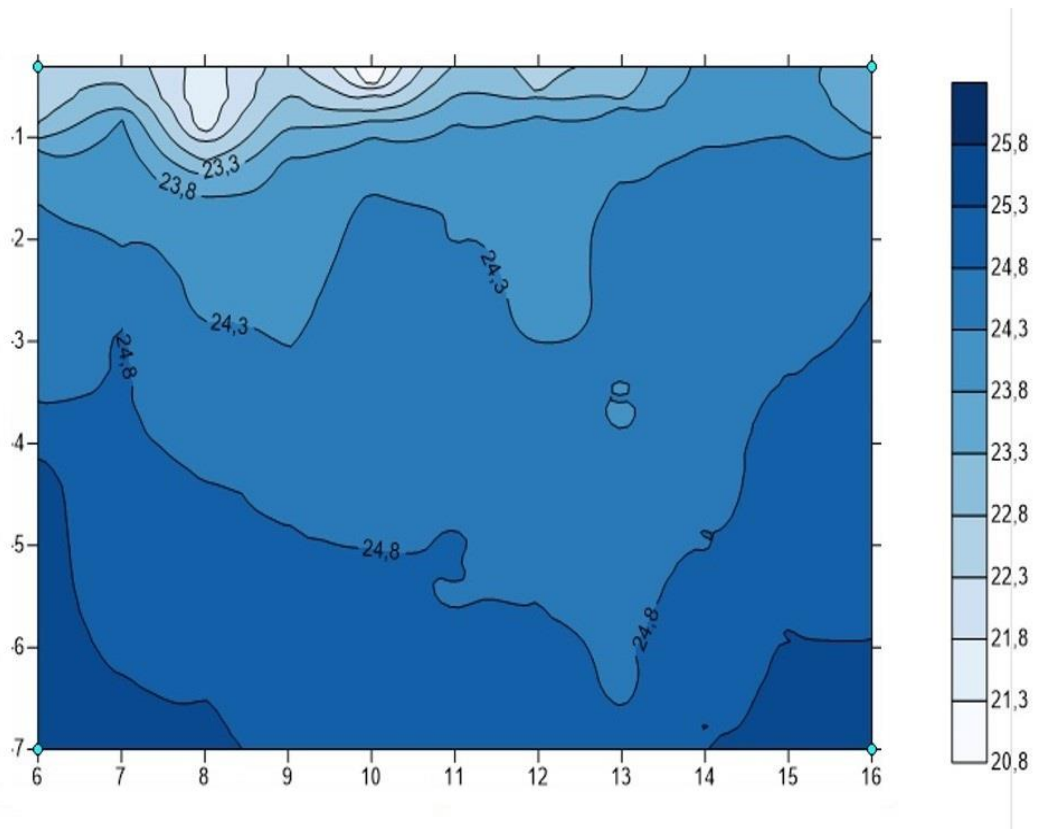


Рис. 3.20. Временная изменчивость солености [‰] воды, пролив Сухая Салма, 6:00 – 16:00  
20.06.2019. сизигия

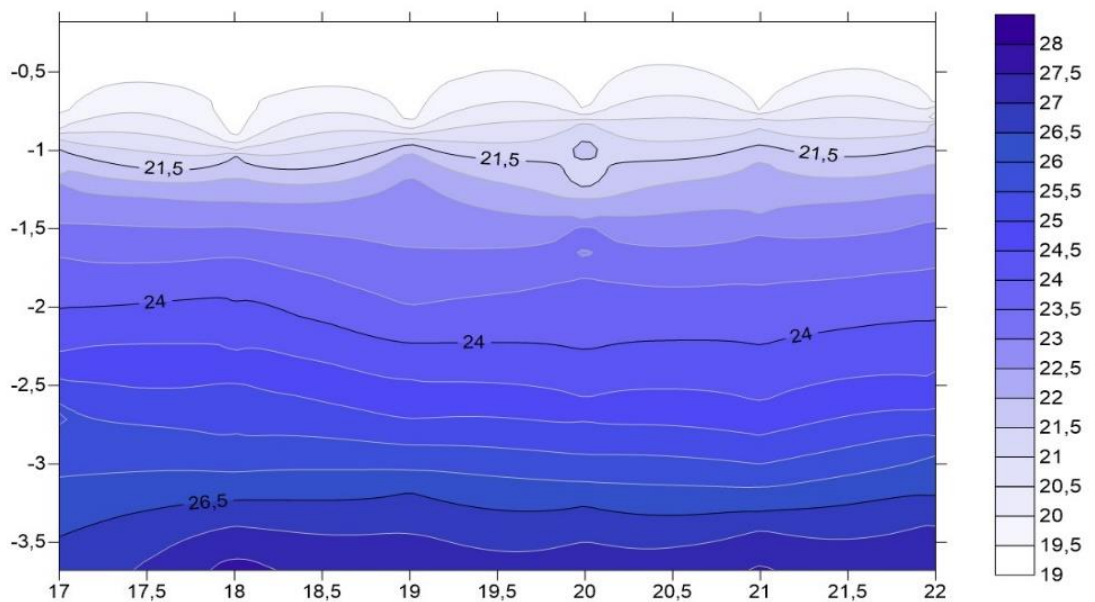


Рис. 3.21. Временная изменчивость солености [‰] воды, лагуна Колушковая, 17:00 – 22:00  
20.06.2019. сизигия

По всей видимости, наблюдавшийся заток оказался не сильным, а проникновение вод со стороны моря было постепенным. Небольшая разница в солёности верхнего слоя лагуны и Сухой Салмы (1-2‰) наблюдалась во время затока, в конце прилива.

В конце летнего сезона, в августе 2020г. удалось провести только кратковременные измерения в проливе Сухая Салма и лагуне, для условий перехода с сизигии на квадратуру (промежуток), которые включали в себя только STD зондирование.

Рассмотрим изменения температуры и солёности в лагуне в период 26.08.2020 9:30 – 13:00. Полная вода была около 9:32, а малая вода наступила в 16:16 согласно предвычислениям программы WXTide32 для о. Средний. Как уже показано по результатам предыдущих сезонов заток в лагуну происходит примерно через 30 мин – 1 час после наступления полной воды в проливе Сухая Салма.

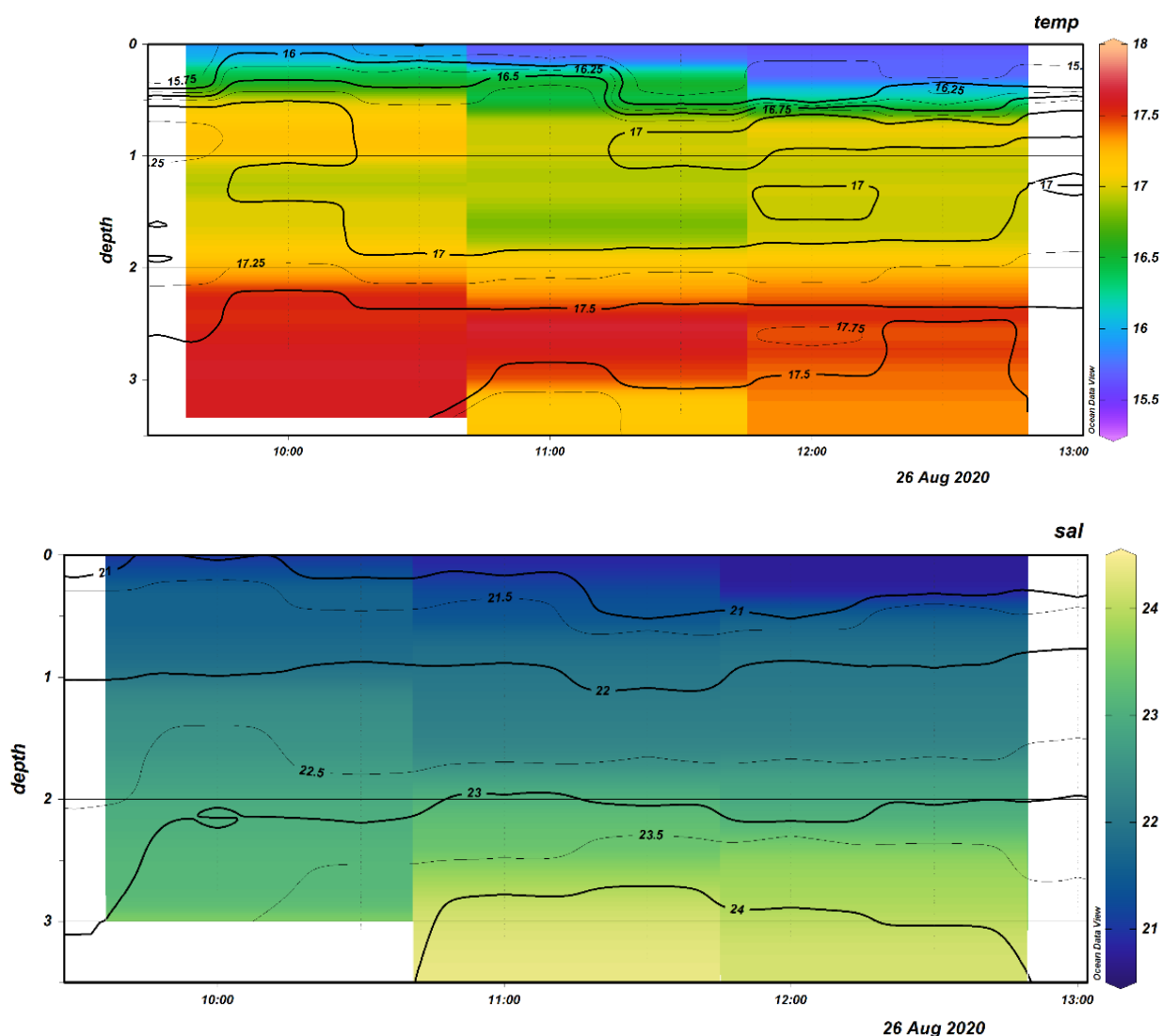


Рис. 3.22 Вертикальные распределения температуры [°C] (сверху) и солёности (снизу) [‰] в лагуне Колюшковая, 26.08.2020 9:30 – 13:00.

Из рис. 3.22 Видно, что воды в лагуне стратифицированы по температуре и солености. После 10:30 через час после предполагаемого затока вод (предполагаемый, поскольку не было наблюдений за уровнем) на поверхности лагуны можно заметить менее соленые (до 21‰) и более холодные (менее 15°C) воды, которые, скорее всего, поступили из пролива Сухая Салма. Также можно отметить небольшое увеличение хлорофилла под конец измерений в лагуне.

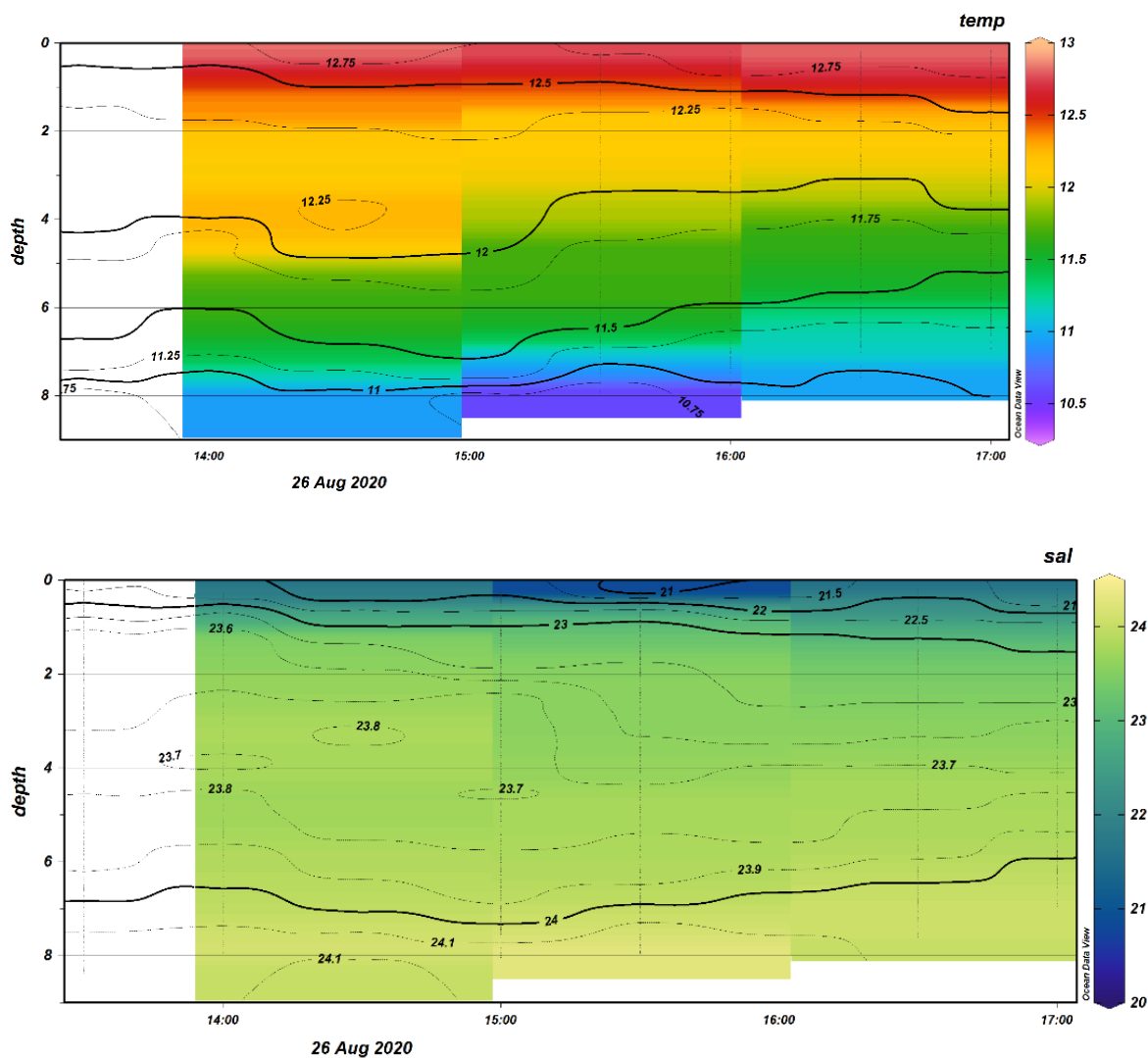


Рис. 3.23. Вертикальные распределения температуры, солености и хлорофилла в проливе Сухая Салма, 26.08.2020 13:30 – 17:00.

Наблюдения в период с 13:30 до 17:00 (рис. 3.23) охватывают вторую половину отлива и самое начало прилива. Данные по температуре и солености показывают, что во время отлива сокращается мощность промежуточного слоя, в то время как поверхностные воды и глубинные остаются одинаково прогретыми и распреснёнными и холодными и осолонёнными соответственно.

В подтверждение выводов, полученных в ходе сезонов 2017-2020гг., а также обнаружения межгодовых различий, в июне 2021г. были выполнены океанологические измерения для квадратурных и сизигийных условий.

20.06.2021г. (квадратура) состоялись многочасовые измерения в лагуне Колюшковая. Термохалинная ситуация оказалась схожей по сравнению с июнем прошлых лет. Толща воды стратифицирована по температуре и солёности. Затока морских вод не произошло. (Рис. 3.24)

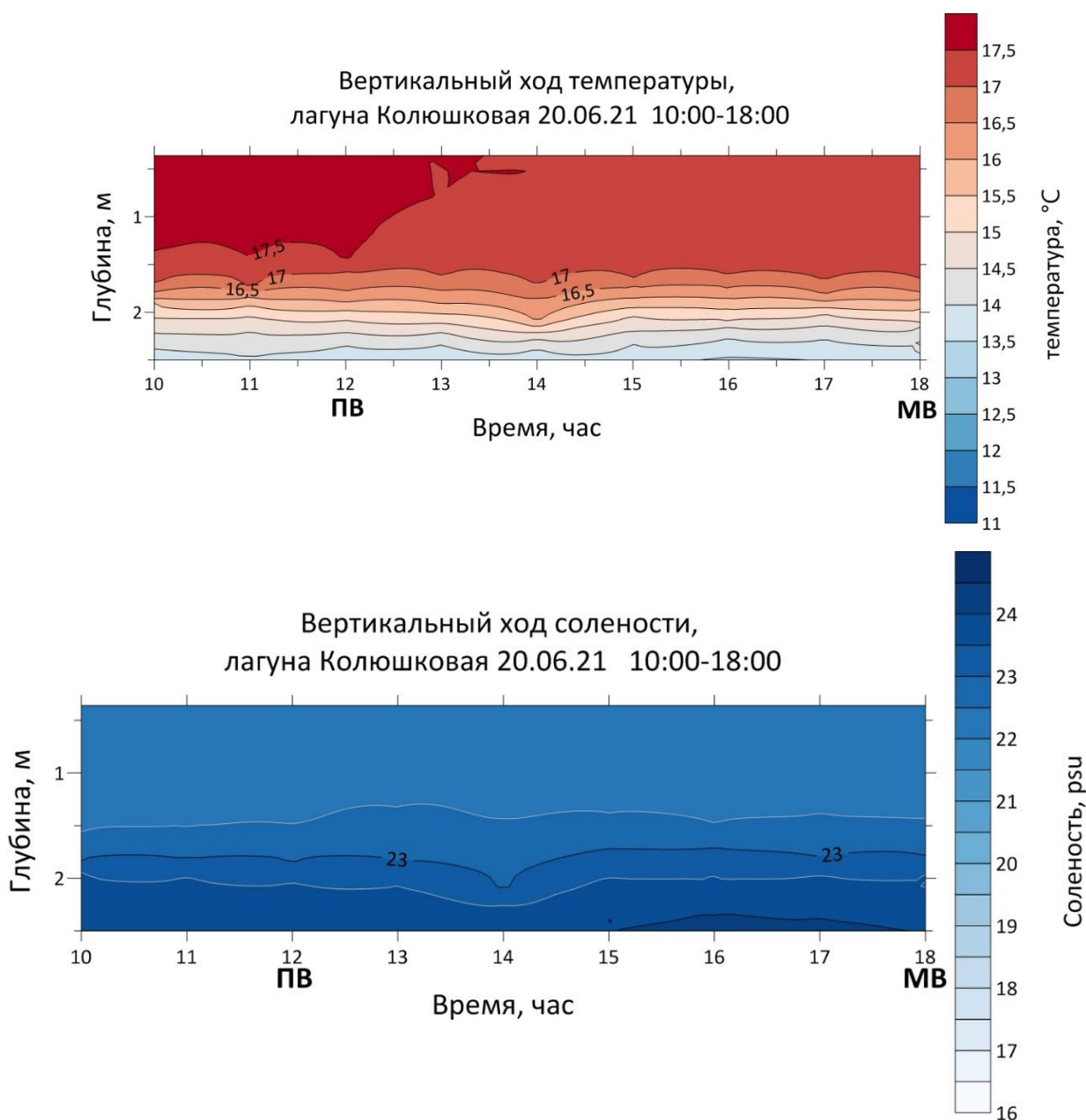


Рис. 3.24. Временная изменчивость температуры [°C] (сверху) и солёности [%] (снизу), лагуна Колюшковая, 20.06.21 10:00 – 18:00. Квадратура.



Поле течений в лагуне выражается в наличии несильных течений в поверхностном слое (не более 10-12 см/с). Глубже течения ослабевают (Рис. 3.25).

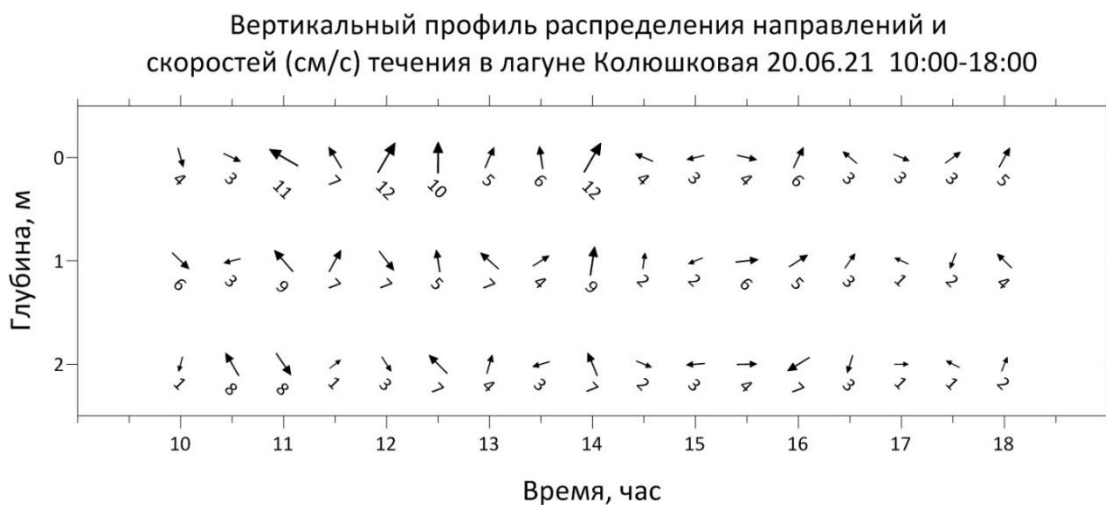


Рис. 3.25. Скорости течений [см/с], лагуна Колюшковая, 20.06.21 10:00 – 18:00. Квадратура

При сизигийных условиях произошёл ожидаемый заток вод и было окончательно подтверждено, что он может наблюдаться при высокой полной воде

Позднее были проведены наблюдения в лагуне Колюшковая и проливе Сухая Салма во время квадратуры (заток вод произошёл около 17-18 ч. (рис. 3.6))

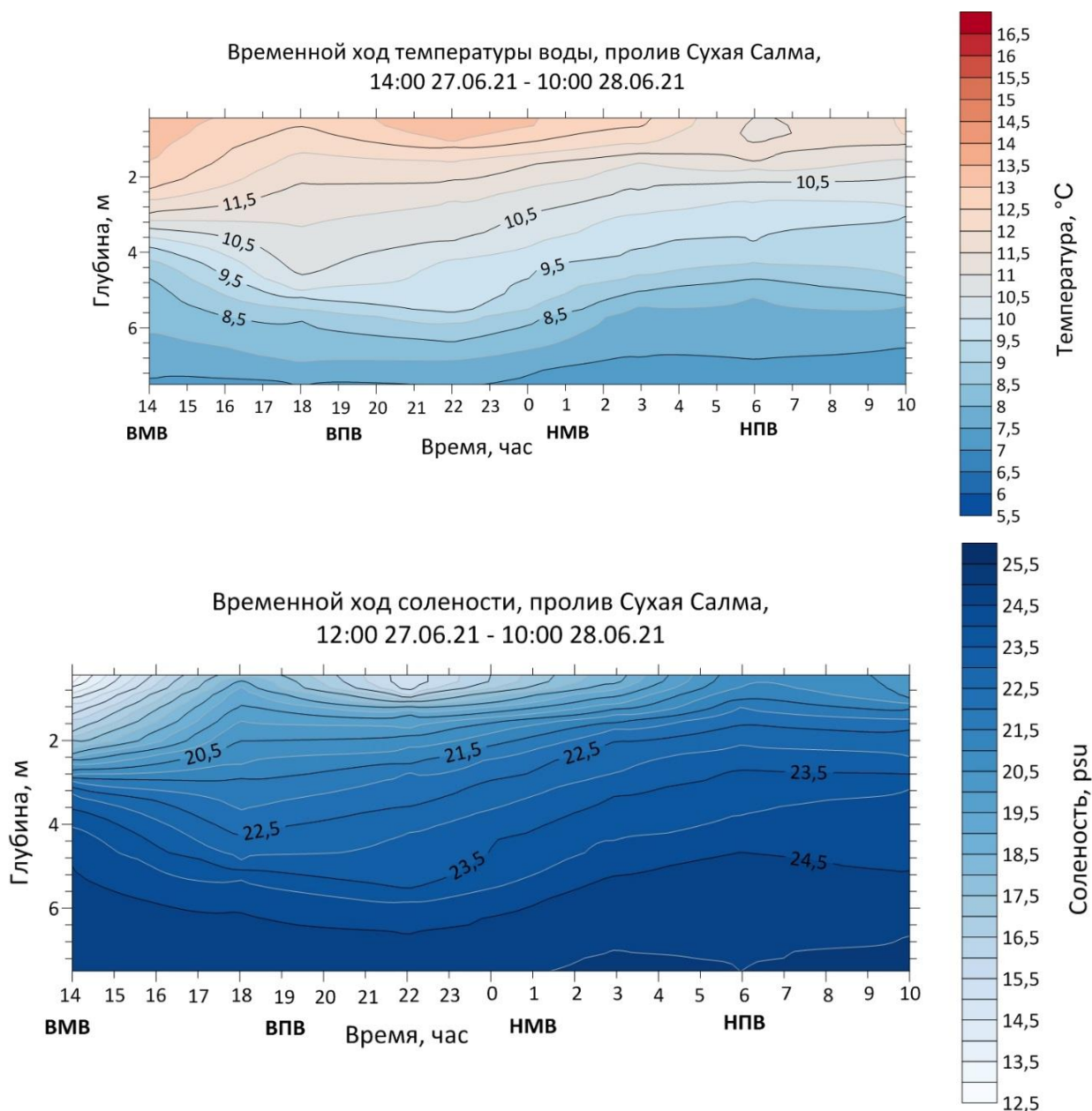


Рис. 3.26. Пространственно-временная изменчивость температуры [°C] (сверху) и солёности [‰] (снизу) в проливе Сухая Салма, 27-28.06.21 14:00 – 10:00. *Сизигия*.

Из рис. 3.26 видно, что изменение температуры и солёности в проливе Сухая Салма напрямую связано с приливно-отливными движениями: так во время приливов в поверхностном горизонте оказалась более солёная (около 22‰) и холодная (12,5°C) вода. Можно отметить падение концентрации хлорофилла до нуля в утренние часы, также хорошо виден подповерхностный максимум концентрации хлорофилла на глубинах 2-4 м.

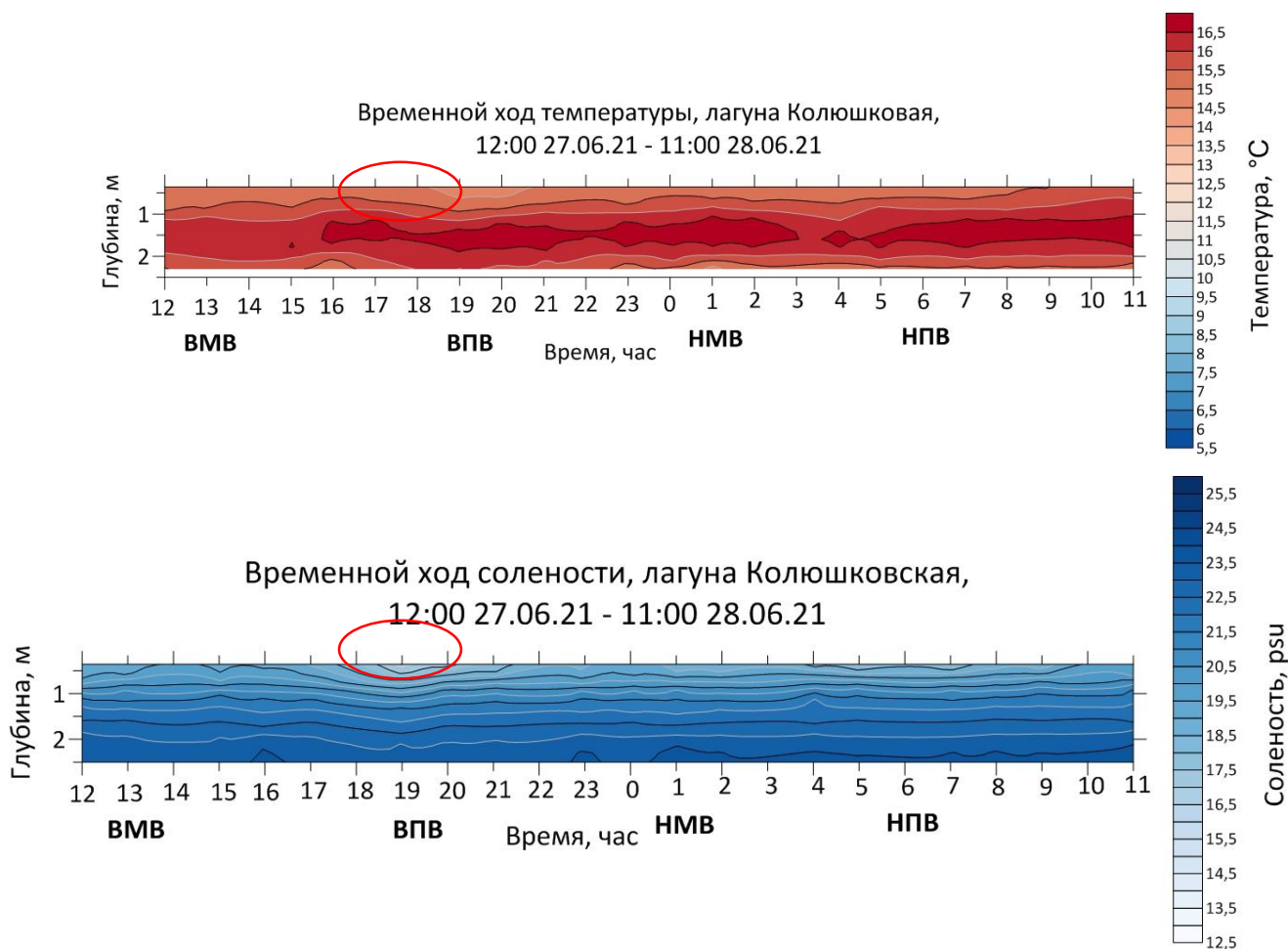


Рис. 3.27. Пространственно-временная изменчивость температуры [°C] (сверху) и солёности [‰] (снизу), лагуна Колюшковая, 27-28.06.21 12:00 – 11:00. Сизигия. Красным обозначен момент затока вод в лагуну.

Очень возможно, что заток морских вод 27-28.06.2021г., что был небольшой. Из рис.3.33 видно, что заток вод почти никак не отразился на температуре и солёности. Можно отметить незначительное снижение солёности на 0,5-1‰ и температуры на 0,5°C.

В июне 2022г., на основании полученных выводов, был проведён полевой эксперимент, детально описывающий момент затока морских вод в лагуну Колюшковая при сизигии, на высокой полной воде. Заток обнаружился в «расчётное» время, в результате чего из Сухой Салмы, при достижении критической высоты уровня перетекли более холодные (9,9°C) и солёные воды (23,8‰) (Рис. 3.28)

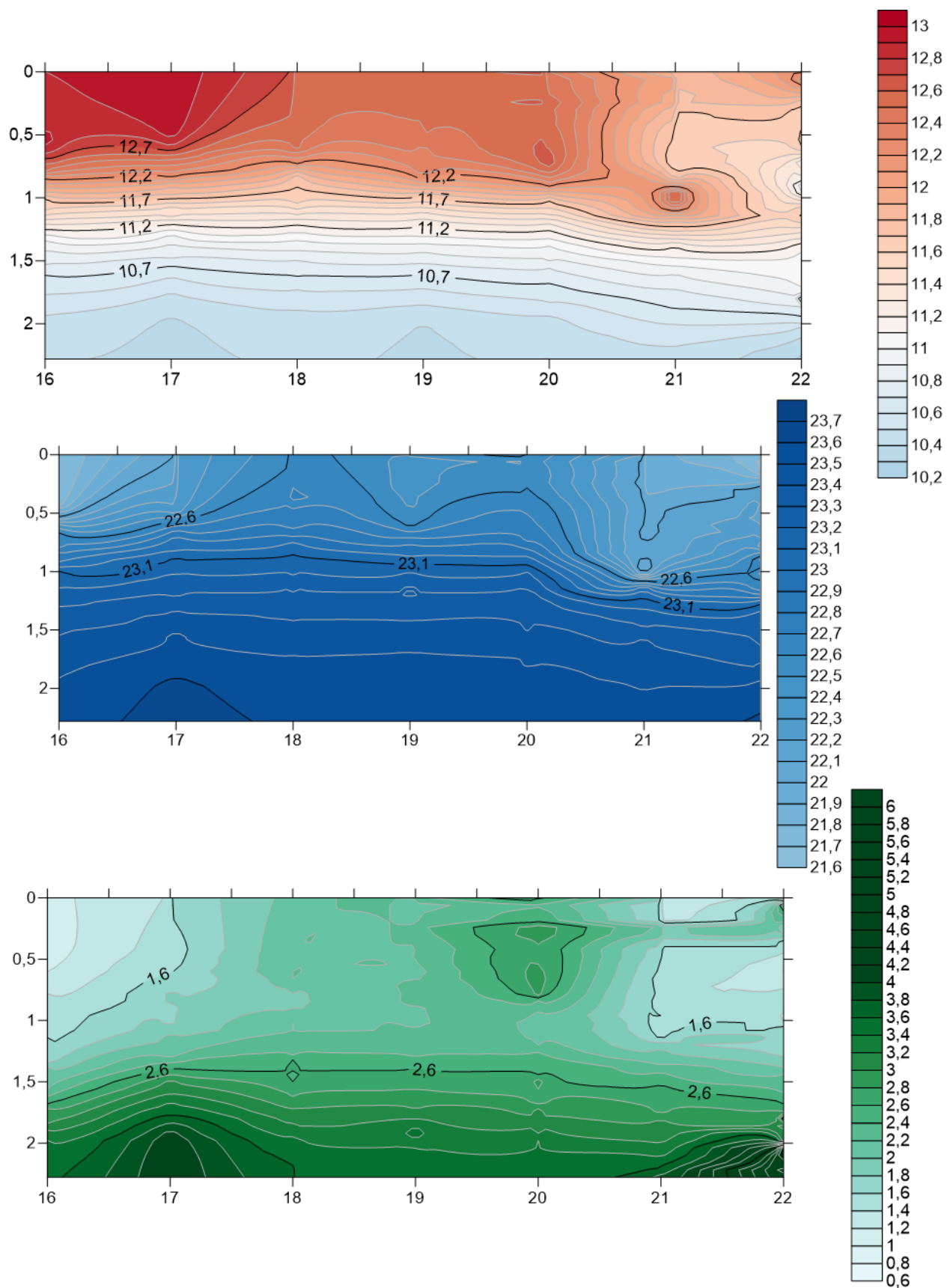


Рис. 3.28. Временная изменчивость температуры (сверху) и солености (посередине) и хлорофилла (снизу) в лагуне Колышковая, 20.06.22 16:00 – 22:00. Сизигия.

Поэтому заток вод оказался хорошо выраженным на ходе температуры и солёности вод в лагуне. Заток вод начал происходить после 20:00 (4-5-й час прилива). В лагуне появились более холодные (11-12°C), но менее солёные (21-22‰) воды, в то время как в самой лагуне воды были более тёплые и солёные, чем в проливе Сухая Салма (приложение 1).

### **«Осенний» сезон**

Наблюдения в рассматриваемой части Кандалакшского залива не проводились в осенний и весенний сезоны, однако во время проведения практики в конце июля-начале августа произошло резкое похолодание на достаточно длительный срок благодаря синоптическим условиям. В таких условиях были проведены краткосрочные измерения в лагуне Колюшковая во время квадратуры, а также ежесуточные измерения в мористой части у острова Средний. Измерения в данных условиях можно приравнять к осеннему сезону. Выяснилось, что из-за воздействия ветра на водную поверхность полуизолированного водоёма и развитием вертикального перемешивания термическое расслоение приобрело новый вид (Рис. 3.29)

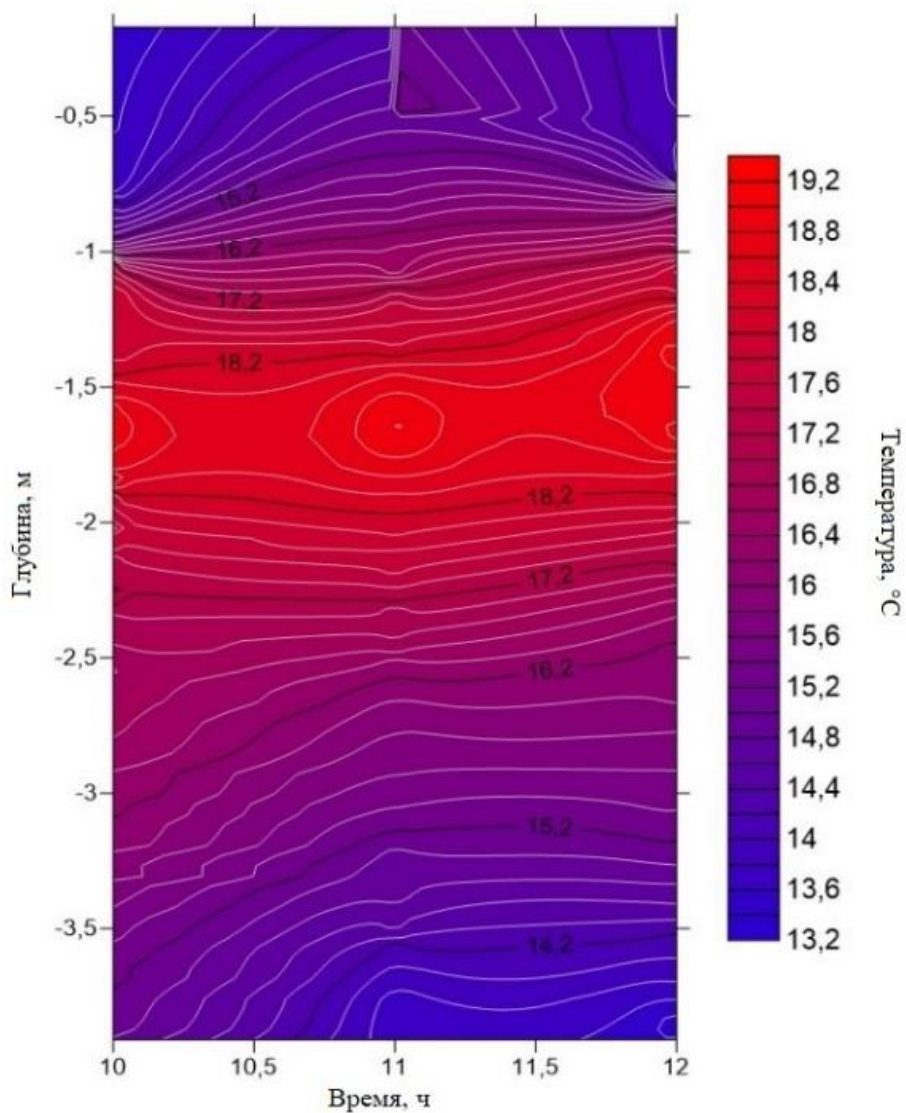


Рис. 3.29. Ход температуры [°С] в лагуне Колюшковая 29.07.2019 10:00 – 12:00.

Температура верхнего (не более 1 м) быстро понизилась до 13-14°С. В слое 1-2 м сохранилось тёплое «ядро» (17-18°С), а в придонном слое сохранилась обычная для этого времени года температура (не более 14°С).

При этом, на внешней акватории (например, в водах у о. Средний) из-за постоянного северного ветра наблюдалось активное выхолаживание верхнего слоя, с постепенным формированием однородной термической структуры (Рис. 3.30):

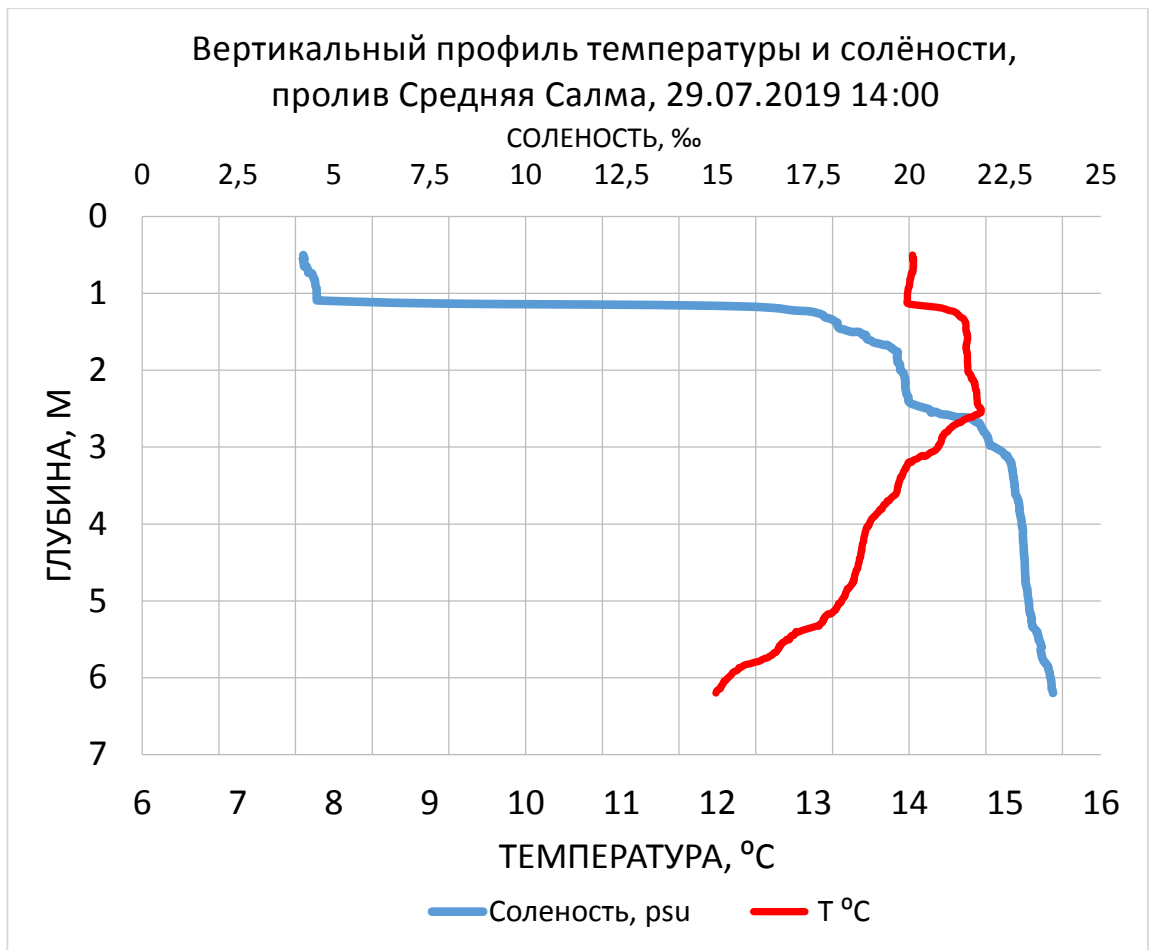


Рис. 3.30. Вертикальный профиль температуры и солёности, о. Средний, 29.07.2019 14:00.

Из рис.3.30 видно, что воды промежуточного горизонта (слой 1 - 2,5 м) теплее всего на 0,6°C в отличие от лагуны, где разница температур таких горизонтов составляет около 4-5°C. Таким образом, видно, что полуизолированность лагуны Колюшковая (при отсутствии морских затоков), позволяет какое-то время удерживать тепло водной толщи в подповерхностном горизонте при резком похолодании.

### 3.2. Губа Лебяжья (с проливом Подпахта)

Система Губа Лебяжья – пролив Подпахта представляет собой часть устьевой области реки Кереть, своего рода эстуарный пролив со сложной морфометрией берегов и специфическим водообменом (рис. 3.31). В отличие от губы Летняя губа Лебяжья защищена от проникновения вод из открытого моря островами Средний и Горелый, а также проливом Подпахта, который имеет две узости: южная – соединяет расширение Подпахты с губой Кереть, куда поступают речные воды, северная – связывает Подпахту с морем. Губа Лебяжья через узкий безымянный пролив соединяется с Подпахтой и представляет собой акваторию с полуизолированным водоёмом (Амазона). В данной работе губа Лебяжья с Амазоной рассматривается как полуизолированная приливная акватория, находящаяся в промежутке между 1-й и 2-й стадией превращения морского водоёма в озеро.



Рис. 3.31 Фрагмент навигационной карты «Подходы к губам Чупа и Кереть, Канадалакшский залив, Белое море», 1989 г. Губа Лебяжья обозначена красным кругом.



Объём выполненных измерений для системы губа Лебяжья – пролив Подпахта оказался существенно меньше и внимание обращалось лишь на основные черты океанологического режима, который оказывает влияние на местную морскую экосистему.

В августе 2021г. в губе Лебяжья проводились океанологические измерения на фазе прилива и отлива (рис 3.32).

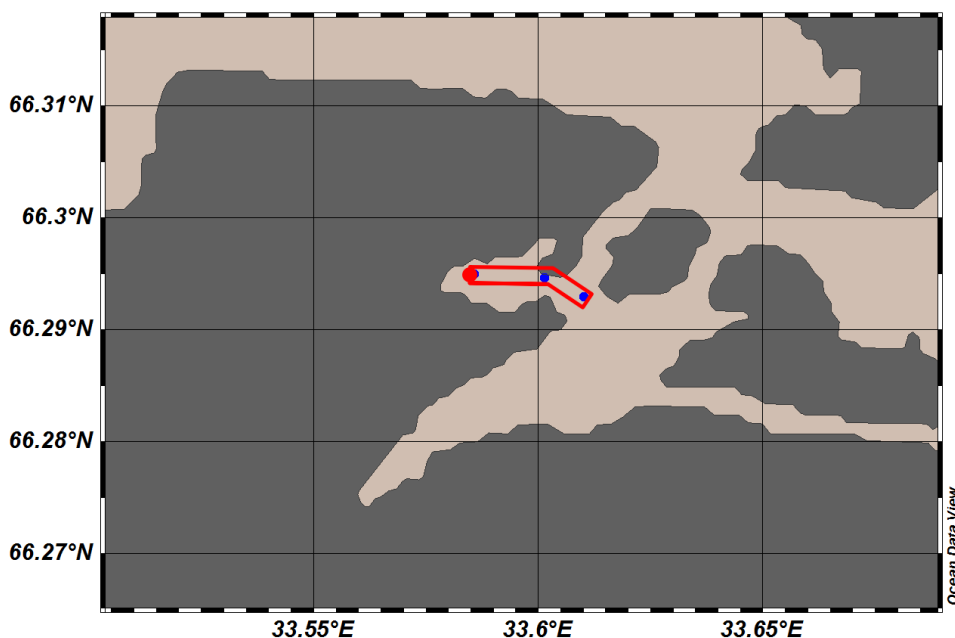


Рис. 3.32. Места проведения измерений в губе Лебяжья, 07.08.21 13:00 – 18:00.

Вертикальное распределение температуры и солёности имеет разный вид, зависящий от приливного режима. Поверхностные воды в кутовой, мелководной части губы Лебяжья прогреты лучше (15-16°C). Глубже располагается слабо выраженный слой скачка, под которым лежат воды с температурой 12-13°C. Ещё глубже температура понижается до 10-11°C. При этом во время отлива прогретые воды распространяются из губы Лебяжья в сторону Подпахты. Во время прилива поступающие из Подпахты более холодные воды смещают их обратно в губу (Рис. 3.33).

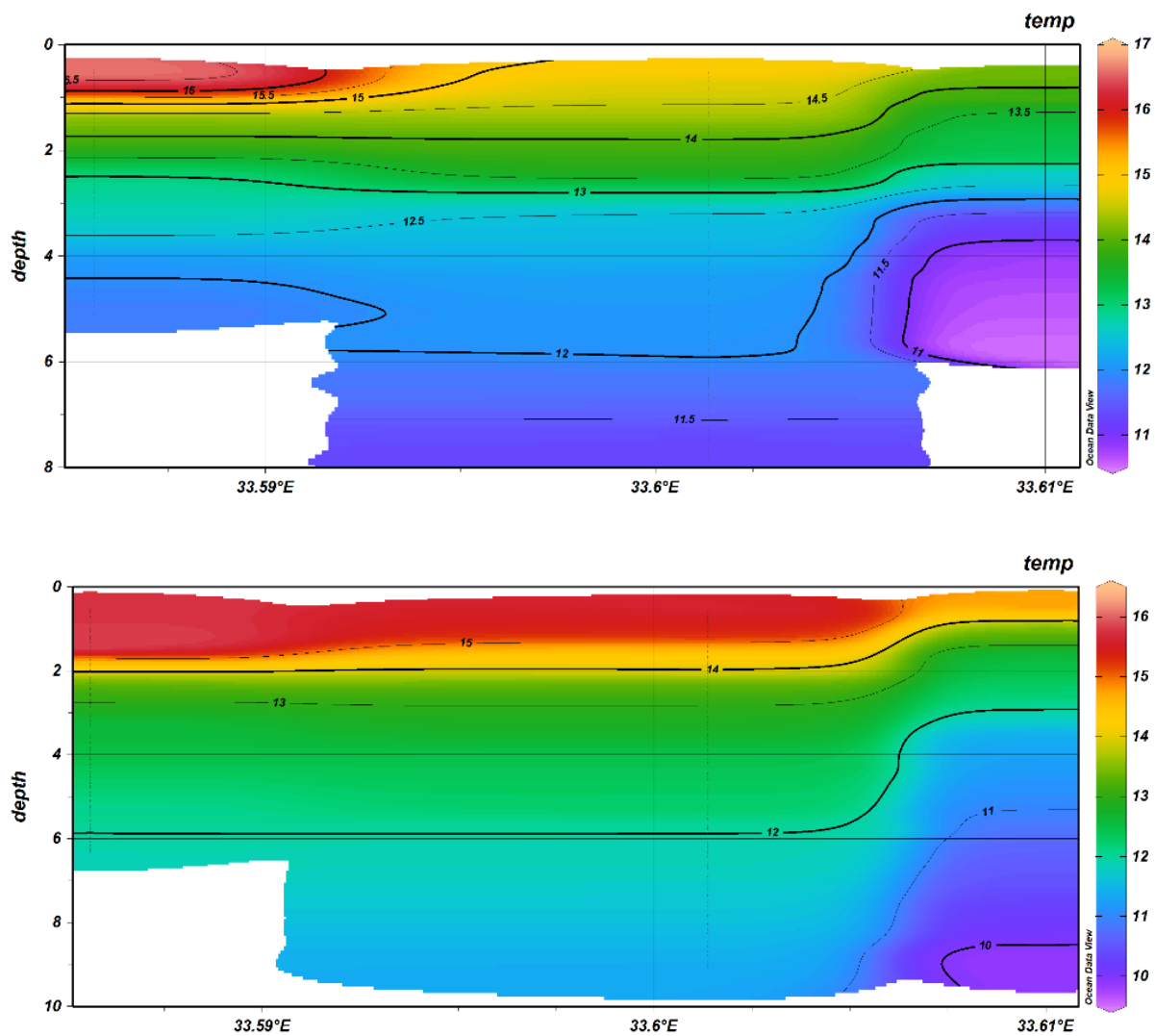


Рис. 3.33. Вертикальное изменение температуры [°C] в губе Лебяжья на фазу прилива (сверху) и отлива (снизу), 07.08.21.

В поле солёности ситуация аналогичная распределению температуры. На входе в губу Лебяжья на глубинах обнаруживается перемещение ядра высокосолёных вод во время прилива и его уход обратно во время отлива. (Рис. 3.33)

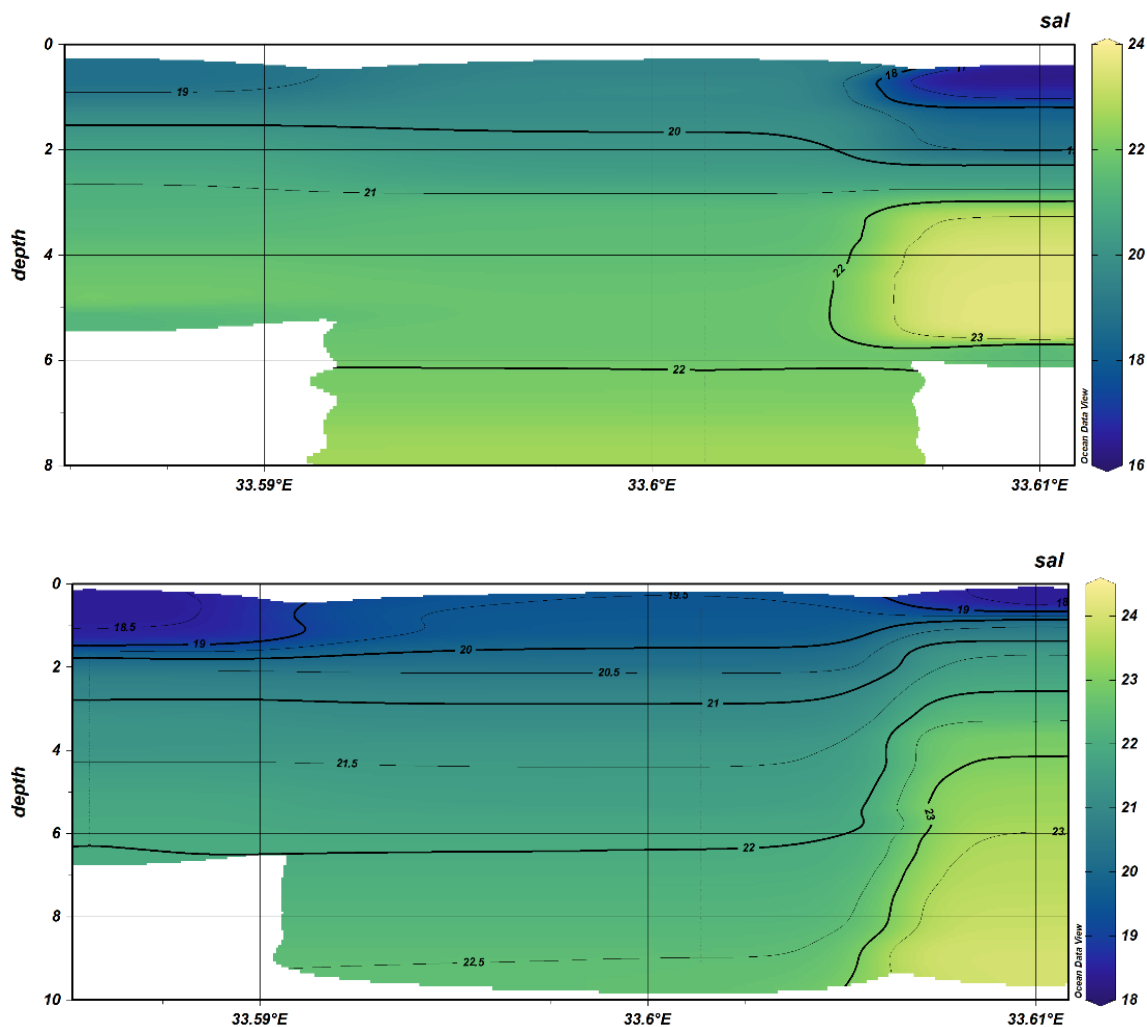


Рис. 3.34. Вертикальное изменение солёности [‰] в губе Лебяжья на фазу прилива (сверху) и отлива (снизу), 07.08.21.

Из рис. 3.33-3.34 видно, что за счет препятствий, описанных в начале данного раздела, более холодные и солёные воды не распространяются по губе Лебяжья, а остаются в центральной части пролива Подпахта между островом Горелый и входом в губу Лебяжья.

В следующем сезоне, 21.07.2022г. году была выполнена комплексная океанологическая съёмка в губе Кереть. Была охвачена и губа Лебяжья, а измерена производились измерения в тех же точках, что и год ранее (рис. 3.35), в конце прилива.

Поверхностные воды в губе Лебяжья, в зависимости от фазы прилива, подвергаются перемешиванию, однако все равно можно наблюдать приток из Подпахты чуть более холодных (17-19°C) и солёных (более 20‰) вод (рис. 3.35).

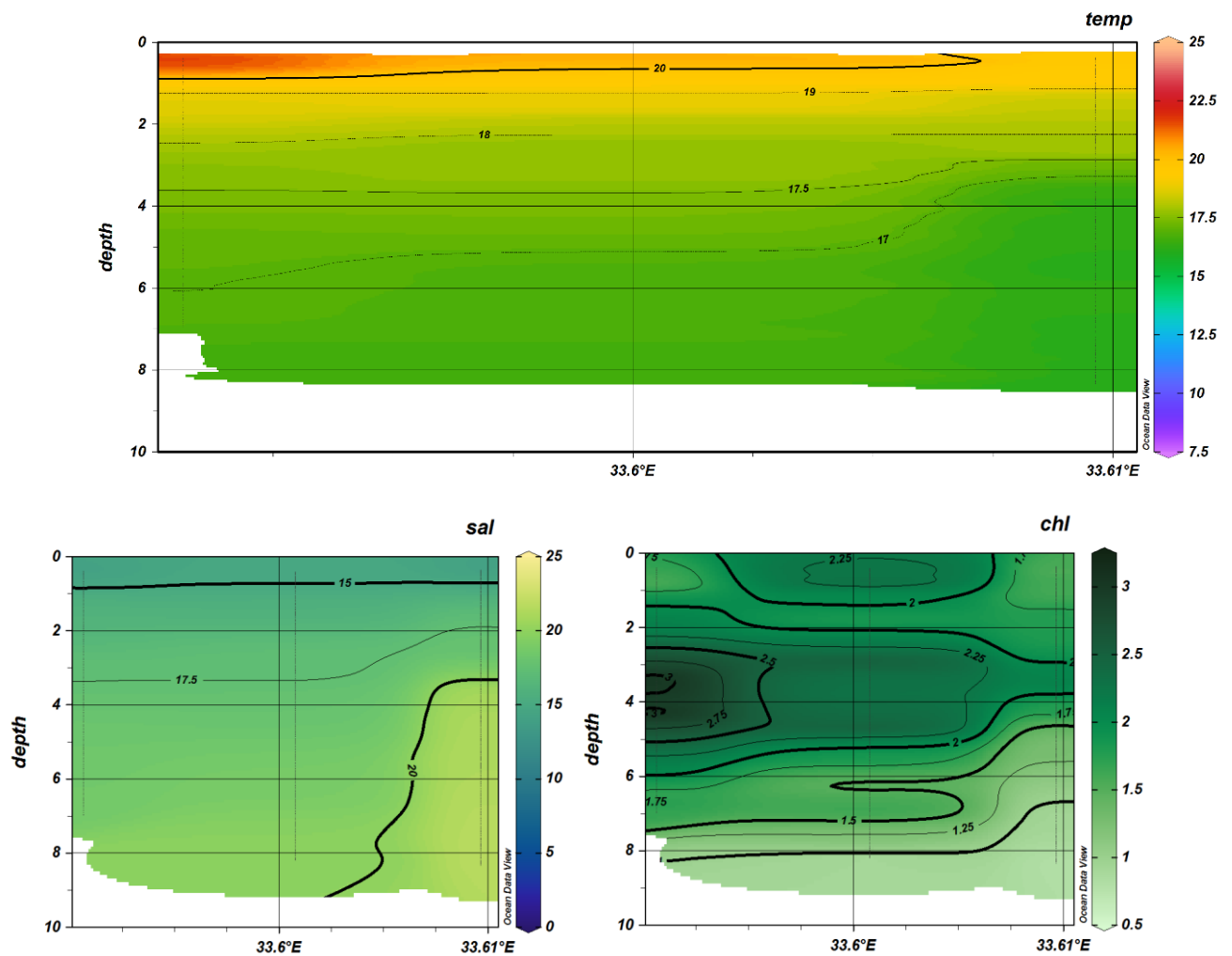


Рис. 3.35. Вертикальное распределение температуры [°C], солёности [‰] и хлорофилла [мг/л] в губе Лебяжья, 21.07.2022 20:00, прилив.

Через несколько дней, 27.07.2022 была выполнен океанологический разрез в самой в губе Лебяжья и небольшом заливе (Амазона), в конце фазы прилива - начале отлива. Полуизолированное, по отношению к основной части акватории, положение этого залива проявилось в распределении изотерм и изогалин. На эту фазу прилива здесь наблюдается совсем иное вертикальное распределение температуры: верхний, относительно тёплый (около 18°C) и нижний, холодный (менее 17°C) слой. (Рис.3.36):

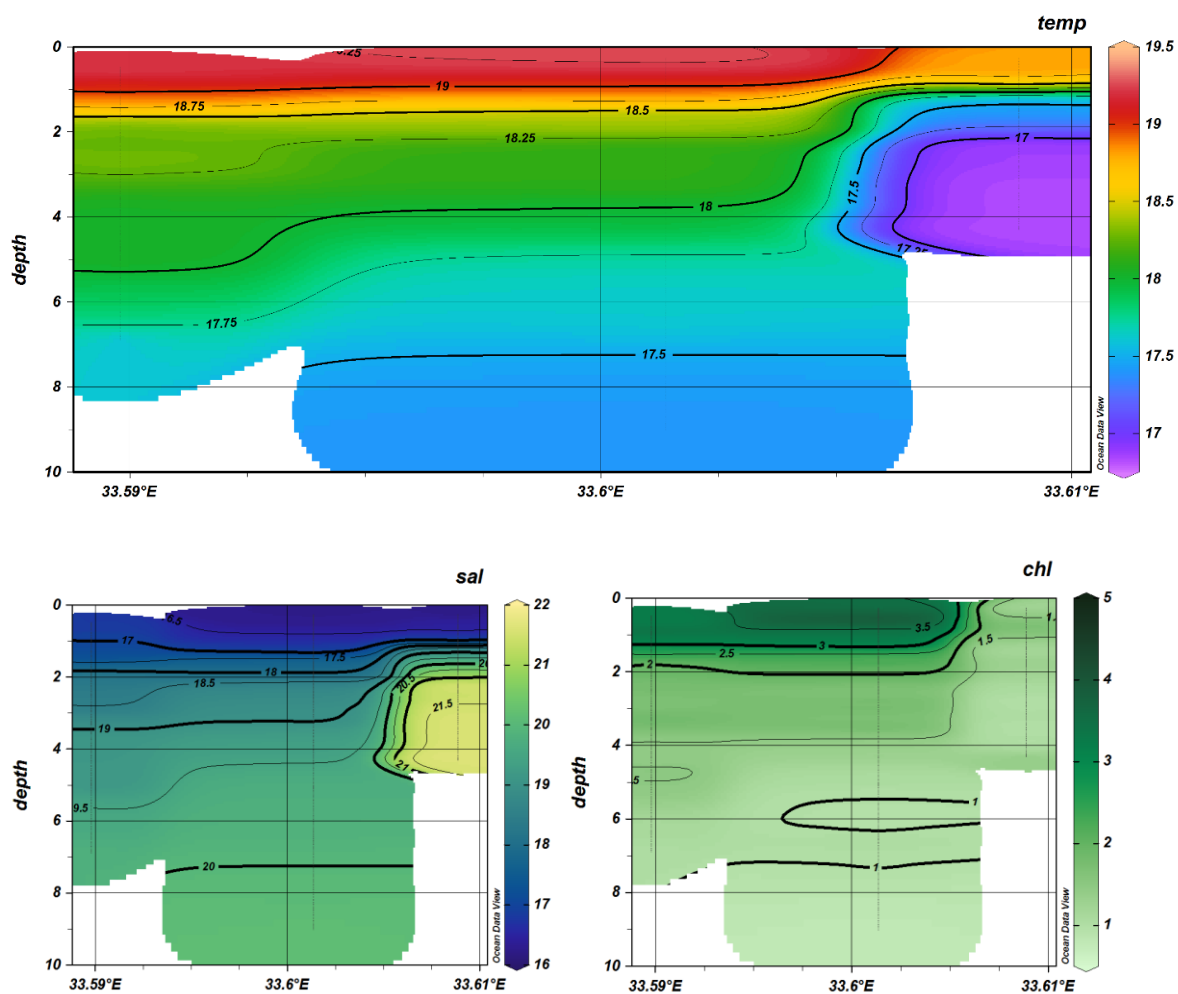


Рис. 3.36. Вертикальное распределение температуры [°C], солёности [‰] и хлорофилла [мг/л] в губе Лебяжья, 27.07.2022 13:00, конец прилива.

Данные рисунки вновь подтверждают, что воды из открытой части моря распространяются по дну, являясь более плотными за счет более высокой солёности (выше 21‰) и низкой температуры (менее 17,5 °C). Концентрация хлорофилла сильно отличается от предыдущих измерений: максимум находится на поверхности.

В другой день здесь же был проведён повторный разрез, но уже в другую фазу прилива: на малую воду и начало отлива (рис. 3.37):

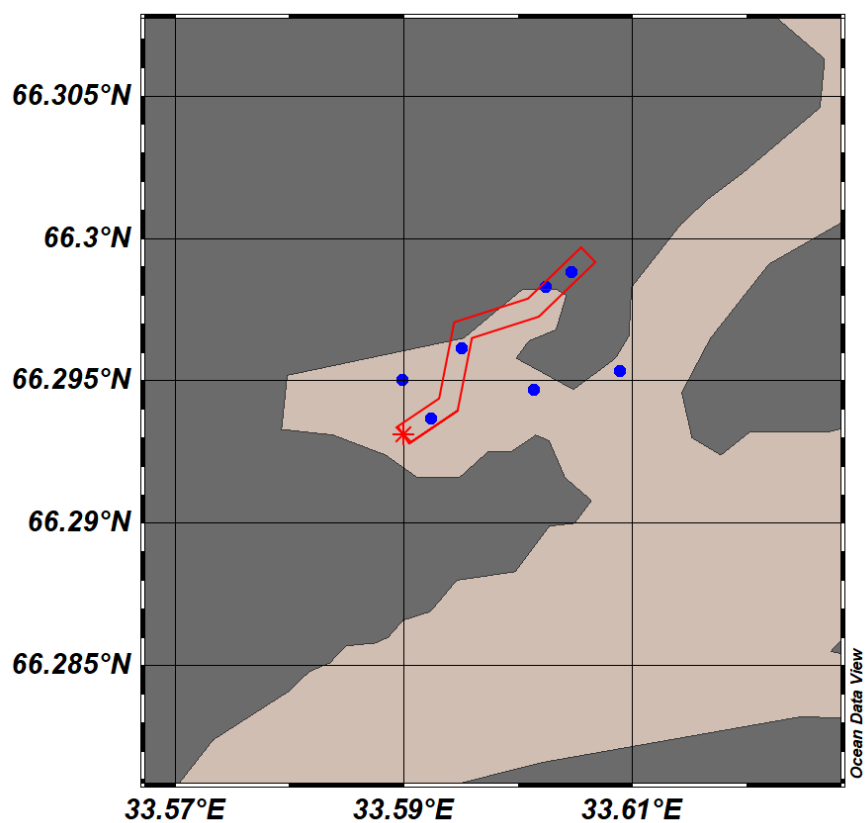


Рис. 3.37 Карта точек измерений, 25.07.2022 12:00 – 16:00.

При отливе, более прогретые и распреснённые воды (по сравнению с губой Лебяжья) распространяются из залива Амазона в губу Лебяжья. (Рис.3.38)

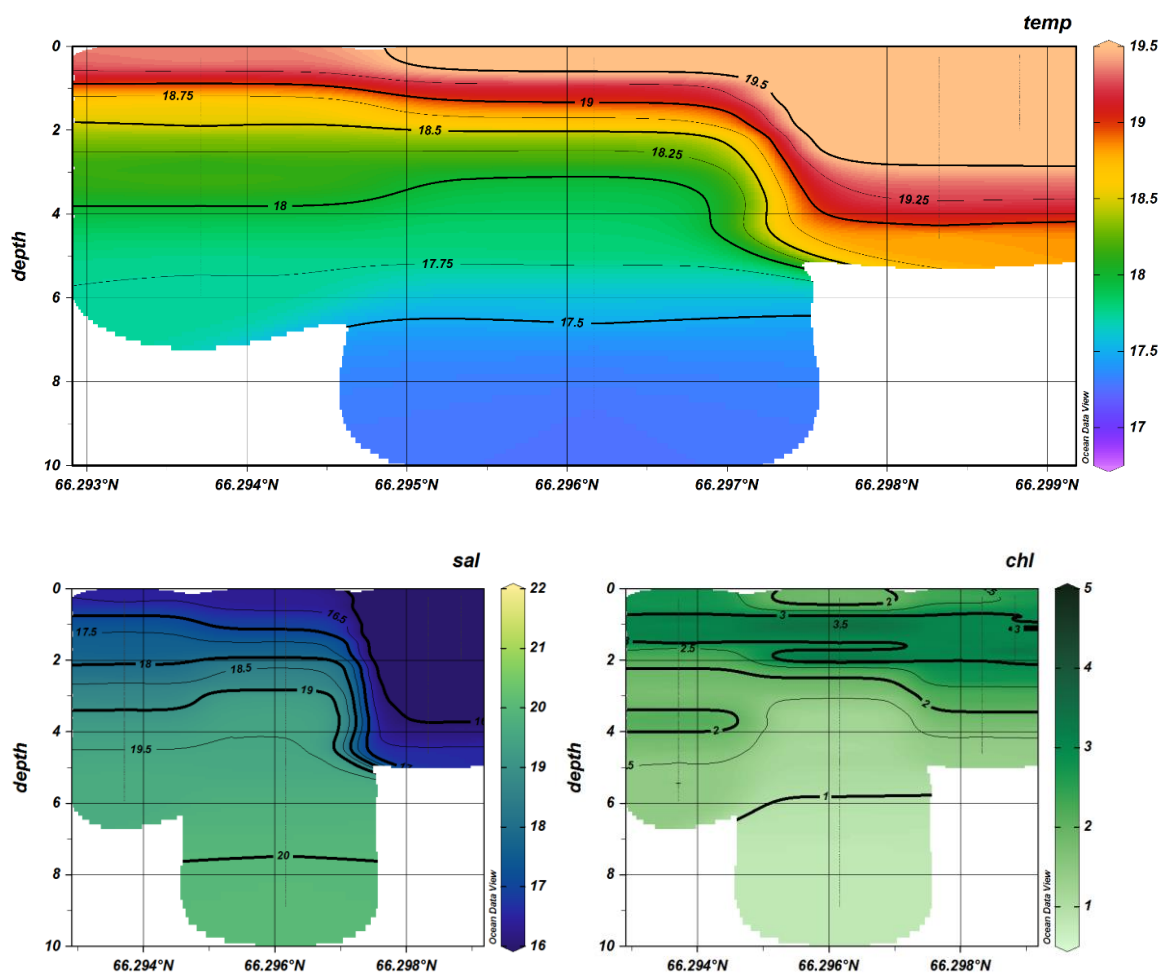


Рис. 3.38. Вертикальное распределение [°C], солёности [‰] и хлорофилла [мг/л] в губе Лебяжья (небольшой залив), 27.07.2022 15:00, начало отлива.

Таким образом, термохалинный режим в системе пролив Подпахта – губа Лебяжья в летний период зависит от фазы прилива. Распределение температуры и солёности воды в центральной части пролива Подпахта и губе Лебяжья различно за счет наличия узкой перемычки между ними. В свою очередь, поле температуры и солёности в губе Лебяжья и полуизолированном мелководном заливе (Амазона) также имеет свои отличия: более прогретые и менее солёные воды в заливе и более холодные и солёные – в губе Лебяжья. Возможно, в залив Амазона, впадает небольшой ручей, за счет которого воды в заливе сильно распреснены, что хорошо видно в правой части рис. 3.38.

### 3.3. Губа Летняя

Губа Летняя представляет собой узкий вытянутый залив с выходом в широкий пролив Глубокая Салма. Данный объект (рис. 3.39) расположен ближе всего к открытой части Белого моря. Также он интересен наличием небольшой р. Летняя, за счет которой в губу Летнюю попадают пресные воды.

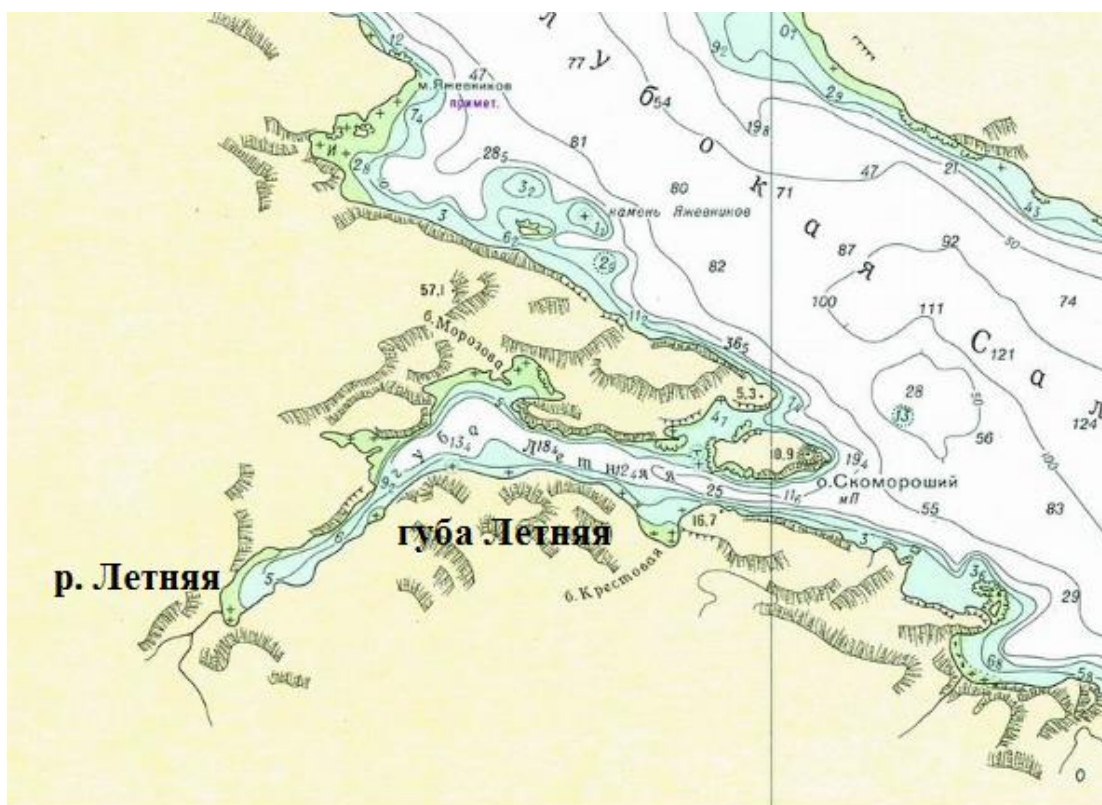


Рис. 3.39 Фрагмент навигационной карты «Подходы к губам Чупа и Кереть, Канадалакшский залив, Белое море», 1989 г.

Океанологическая съемка в губе Летняя была проведена в самом начале отлива 25.07.2022.



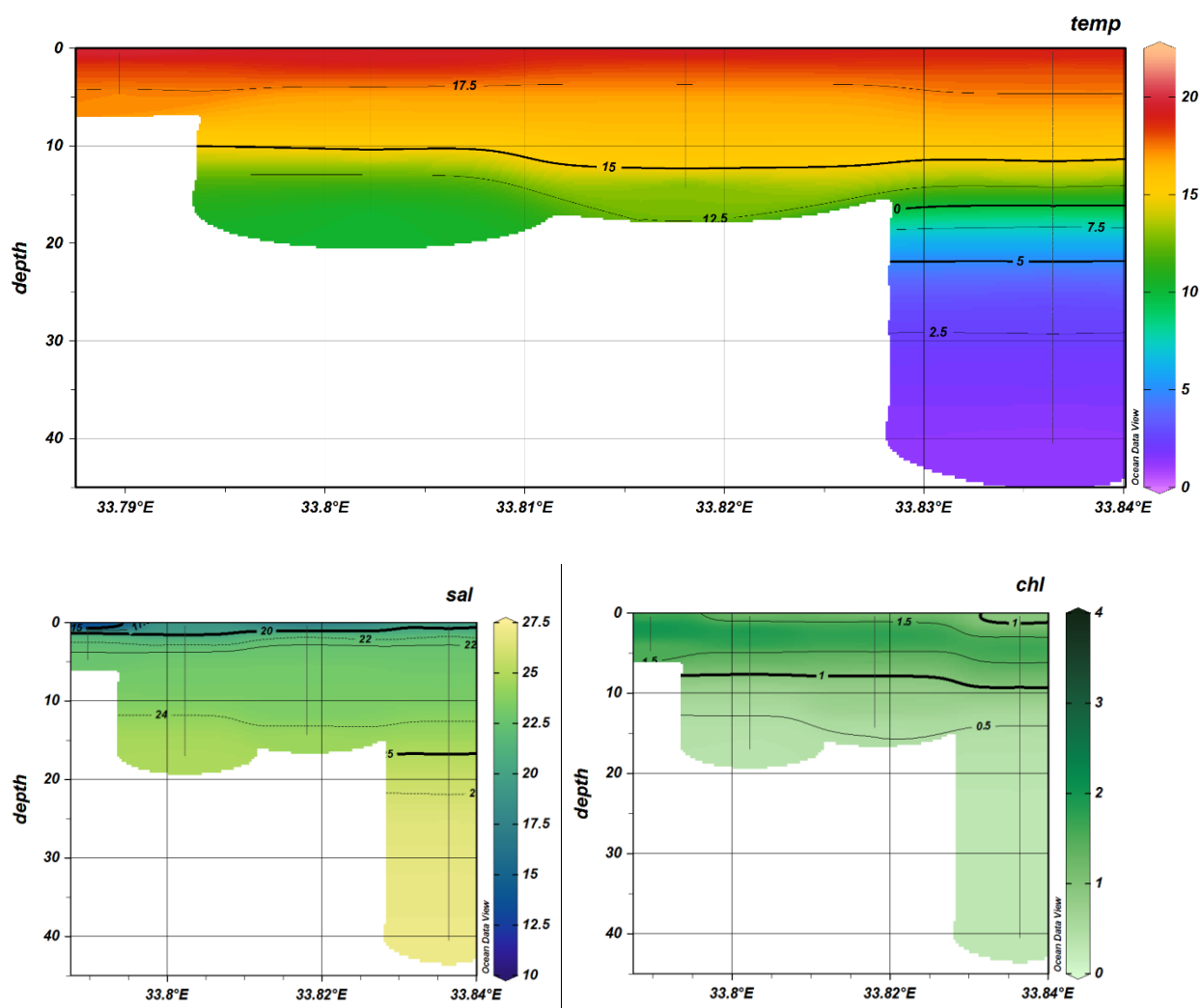


Рис. 3.40. Вертикальное распределение температуры [°C], солёности [‰] и хлорофилла [мг/л] в губе Летняя, 25.07.2022 15:00, начало отлива.

Из рис. 3.40 видно, что воды в губе Летняя стратифицированы по температуре и солёности. Можно увидеть, что в отличие от вод р. Кереть, распространяющихся далеко в от устья, воды р. Летняя распространяются не так далеко, а сразу перемешиваются с подповерхностными более солёными водами, и к открытой части моря (на выходе из губы Летняя) следов распресненных вод уже не наблюдается. По хлорофиллу существует подповерхностный максимум около 1 мг/л на глубине около 10 м. В конце губы Летняя на горизонтах ниже 30 м наблюдаются холодные (1-2°C) и солёные воды (выше 27‰), которые не попадают внутрь губы за счет ее мелководности.

## Зимний сезон

В марте 2021 г. впервые были выполнены зимние измерения на различных участках акватории вокруг Керетского архипелага. Часть работ (океанологических, снегомерных и ледемерных) была сделана и для вод системы Лагуна Колюшковая - пролив Сухая Салма (Рис.3.41).

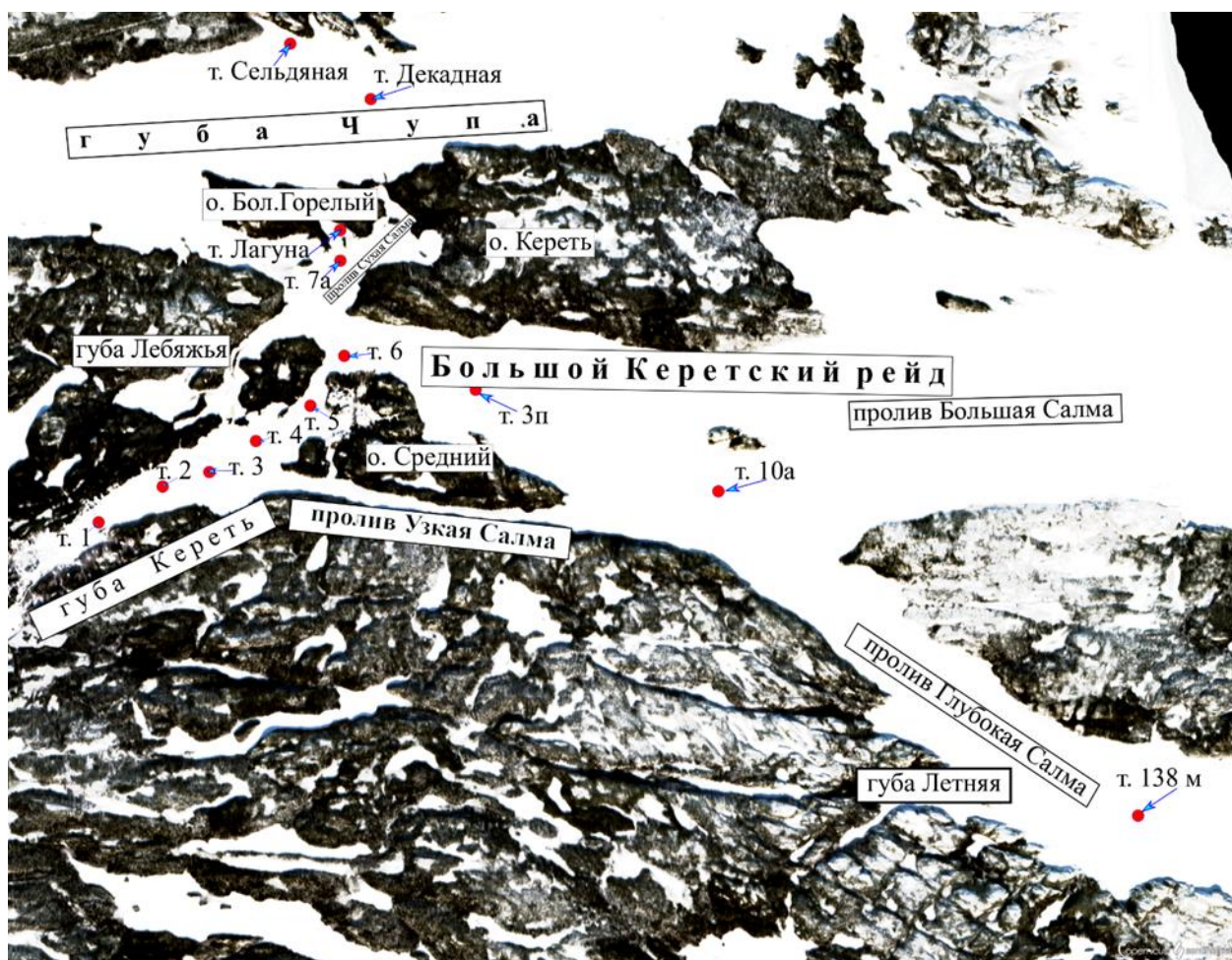


Рис.3.41. Места проведения CTD-зондирования в устьевой области р.Кереть, 11-14.03.2021.

Довольно толстый лёд (более 50 см) наблюдался в проливе Сухая в Средней Салме (закрытая от моря часть устьевой области реки Кереть). В узкой части пролива между островами Средний и Горелый толщина льда была меньше (около 30 см). По распределению толщин льда видно, что больше всего льда намораживается в закрытых от моря (динамически «спокойных») акваториях (рис. 3.42).

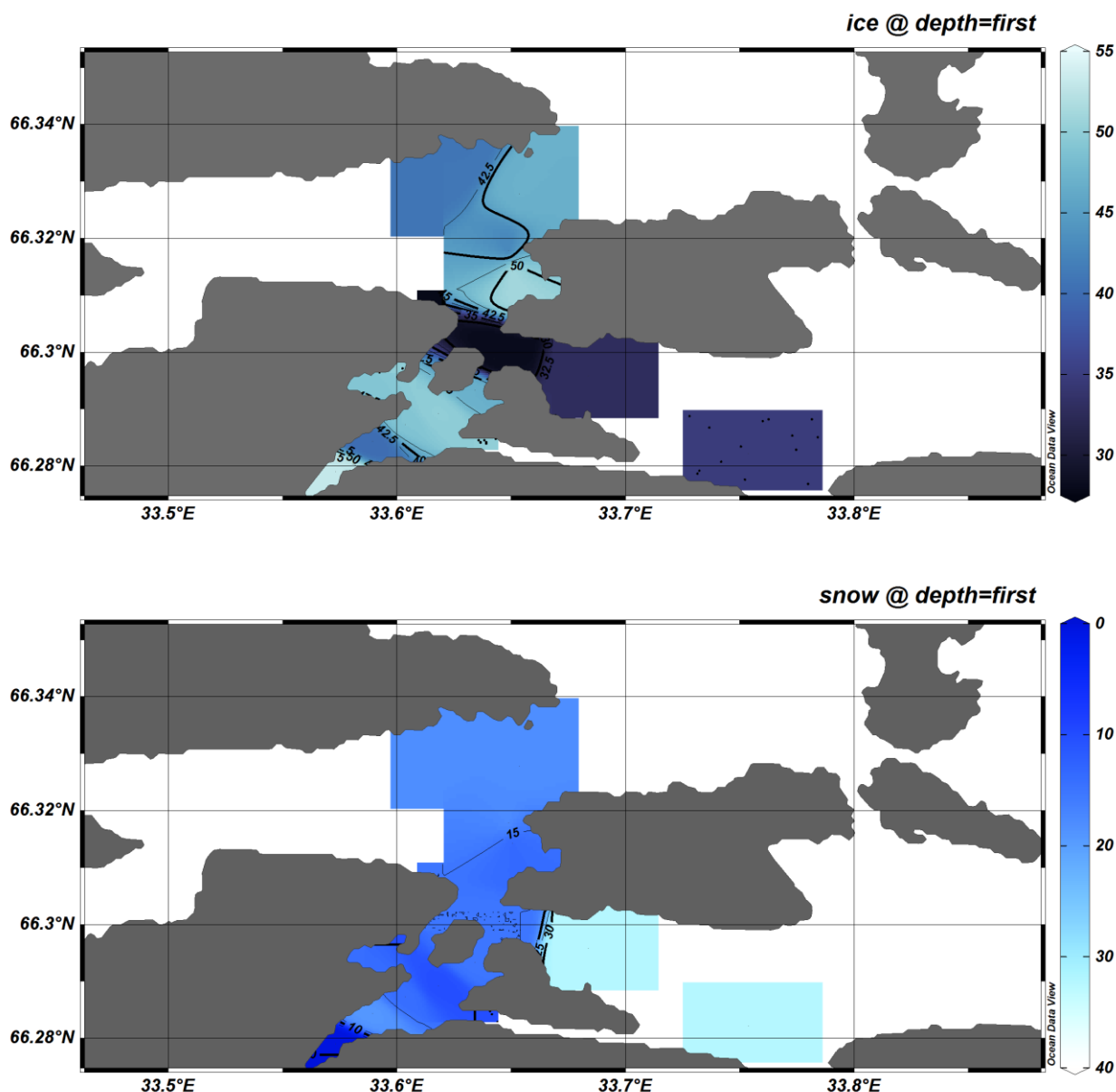


Рис. 3.42. Распределение толщин льда (сверху) и снежного покрова (снизу) в устьевой области р. Кереть, 11-14.03.2021.

12.03.2021г. в лагуне Коюшковая и в проливе Сухая Салма проводилось STD-зондирование, в результате чего было обнаружено, что термохалинные условия лагуны, также, как и в другие сезоны года, заметно отличаются от морской акватории (Сухая Салма). На момент измерений солёность на поверхности составила 16-17‰, а глубже 1 м около 23-24‰, в то время как в проливе Сухая Салма солёность вод глубже 1 м достигала 26‰. Очень возможно, что такое отличие возникает: 1) вследствие притока в холодную часть года высокосолёных вод из открытой части Белого моря, 2) затоковых обстановок в лагуну в зимнее время, которое дополнительно затруднено из-за наличия ледяного покрова. Т.е., нельзя исключать то, что зимой в лагуне Колюшковая остаются воды, поступившие

ещё при осенних сизигийных затоках. Также за счёт небольших глубин воды и ограниченного водообмена в лагуне охлаждение вод отличается от охлаждения вод на внешней акватории: температура воды на поверхности составляет около  $-0,8^{\circ}\text{C}$ , глубже она понижается падает до  $-1^{\circ}\text{C}$  (на 1-2 м), а у дна несколько возрастает (до  $-0,5^{\circ}\text{C}$ ). Наоборот, в проливе Сухая Салма температура на поверхности выше (около  $-0,2^{\circ}\text{C}$ ), понижается до  $-0,5^{\circ}\text{C}$  на 3 м, а затем у дна достигает минимума ( $-0,6^{\circ}\text{C}$ ). (Рис.3.43)

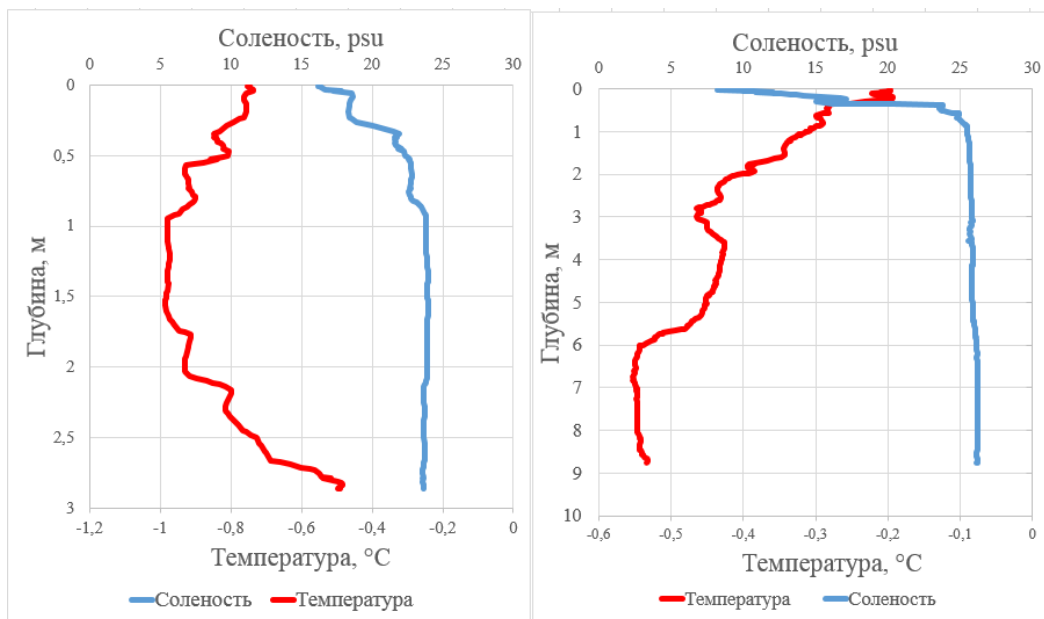


Рис. 3.43. Вертикальные профили температуры и солености в лагуне (слева) и проливе Сухая Салма (справа), март 2021г.

Толщина льда зимой 2021г. оказалась больше в проливе Сухая Салма (52 см), чем в лагуне (43 см), а высота снежного покрова была больше в лагуне (18 см против 12 см) (Рис.3.44.)

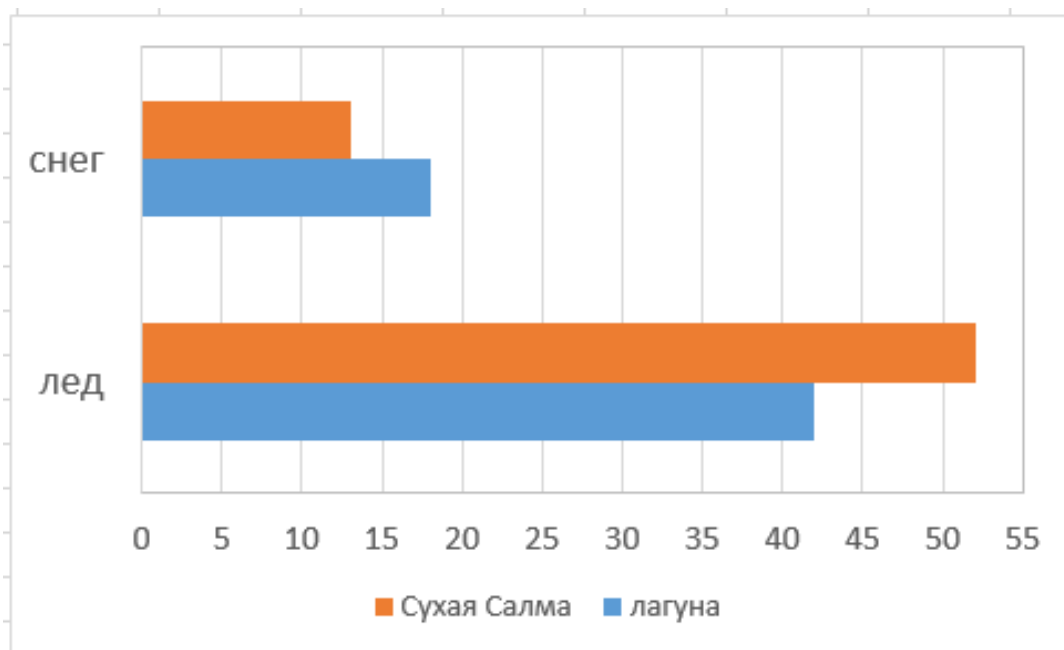


Рис. 3.44 Толщина льда и высота снежного покрова в лагуне и проливе Сухая Салма, 12.03.2021.

В зимний сезон 2023 года были проведены вторые зимние океанологические измерения в исследуемой акватории, в программу которых вошло STD-зондирование в центральной части губы Лебяжья и в заливе Амазона (рис. 3.45), которое проводилось впервые:

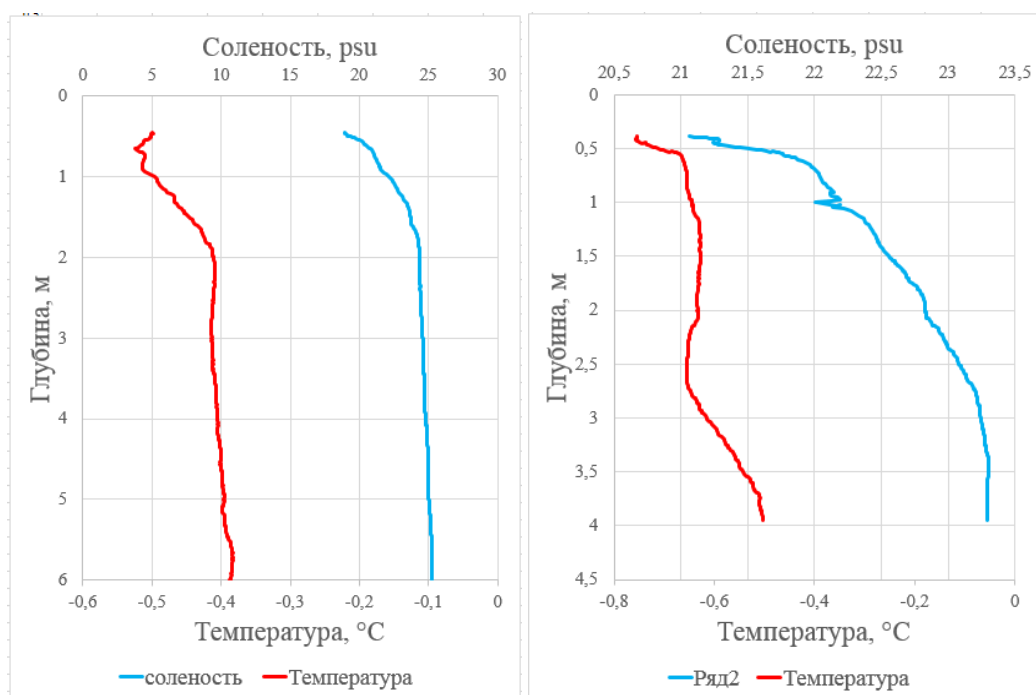


Рис. 3.45. Вертикальные профили температуры и солености, губа Лебяжья (слева), залив Амазона (справа), 16/03/2023.

Из сравнения данных профилей (рис. 3.45) видно, что воды в губе Лебяжья более теплые и соленые. Также видно, что изменение солёности в Амазоне происходит от поверхности до глубины 3-3,5 м, в то время как в губе Лебяжья галоклин находится на 1-2 м.

В марте 2023г. были проведены повторные зимние океанологические измерения в системе лагуна Колюшковая – пролив Сухая Салма.

Оказалось, что, как и в марте 2021 г. в лагуне наблюдается более высокий снежный покров, а в Сухой Салме - более толстый лёд. Толщина льда в целом составляла 40-45см, т.е. примерно на 10 см меньше, чем 2 года назад: (Рис.3.46)

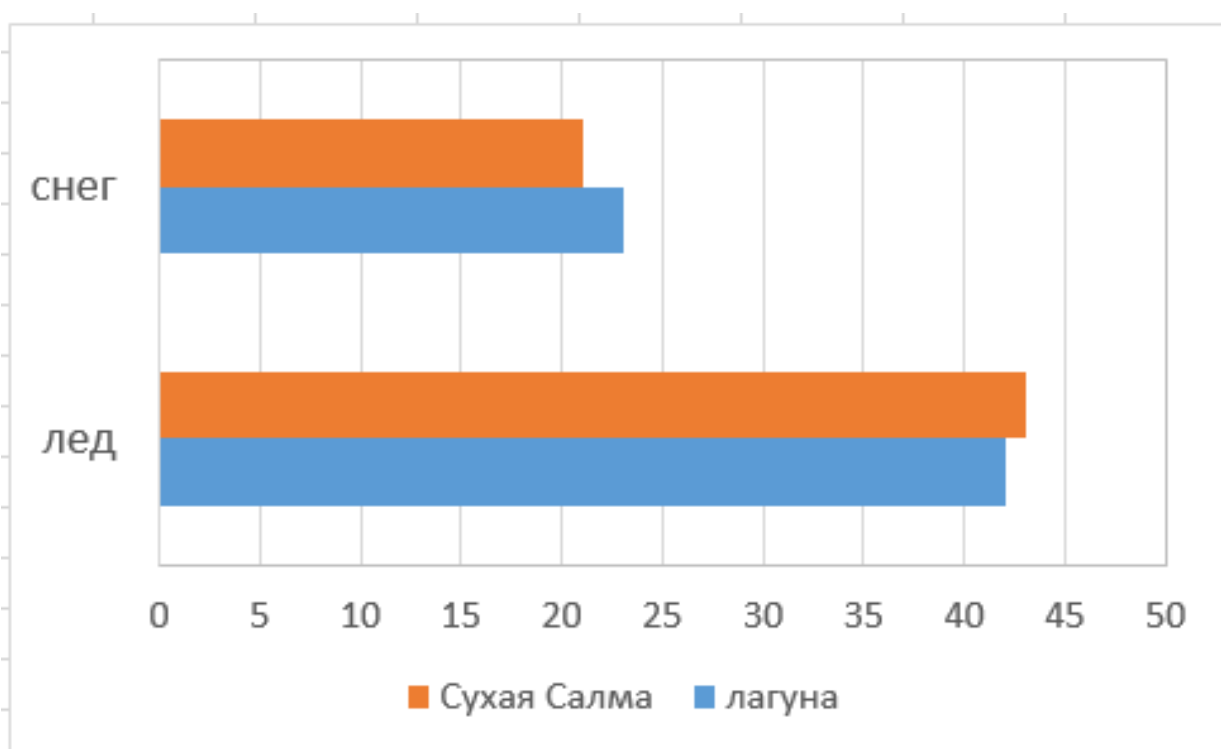


Рис. 3.46. Толщина льда и высота снежного покрова в лагуне и проливе Сухая Салма, 15.03.2022.

Вертикальное распределение температуры и солёности в лагуне Колюшковая и вне её заметно отличается отличаются друг от друга (рис. 3.47). В лагуне наблюдается монотонное увеличение солёности и температуры от поверхности до дна, а в Сухой Салме в слое 1-2 м наблюдаются выраженные скачки температуры и солёности, и глубже 2 м морские воды имеют постоянные значения температуры (-0,4°C) и солёности (27‰). В лагуне температура воды колеблется от -1,2°C до +1°C, а в Сухой Салме – всего лишь между -0,4°C и -0,75°C. В лагуне в поверхностном слое располагаются солёные воды (около 25‰), и с глубиной она увеличивается до 27‰. С Сухой Салме поверхность несколько опреснена (19-21‰), с

глубиной солёность растёт (более 27‰), при этом изогалина 27‰ была обнаружена на глубинах 3-5 м, чего не наблюдалось ни в марте 2021г., ни в тёплое время года. (рис. 3.36)

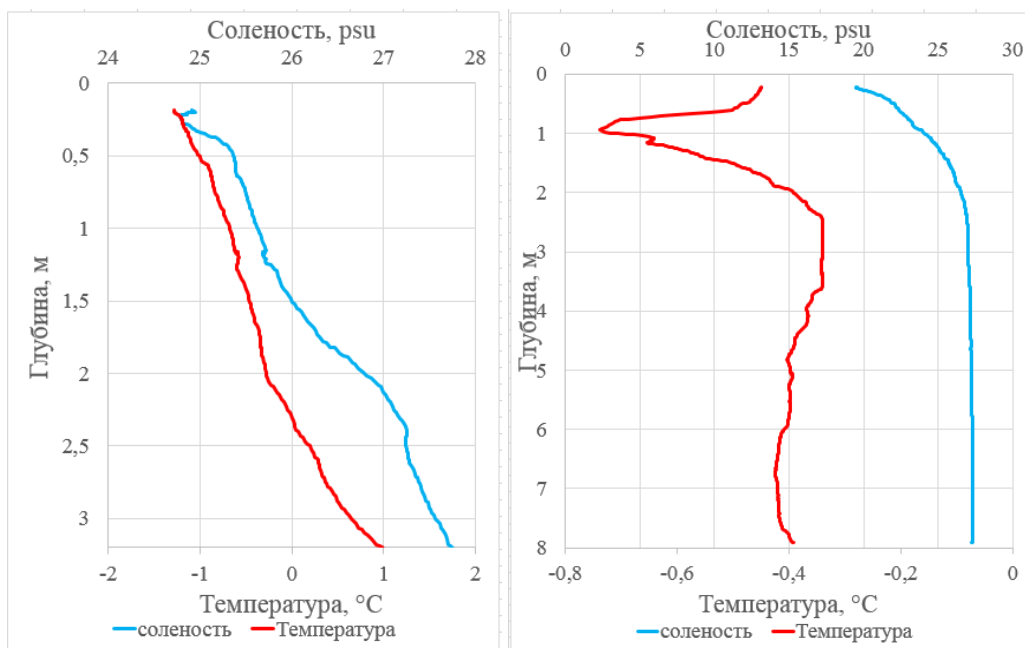
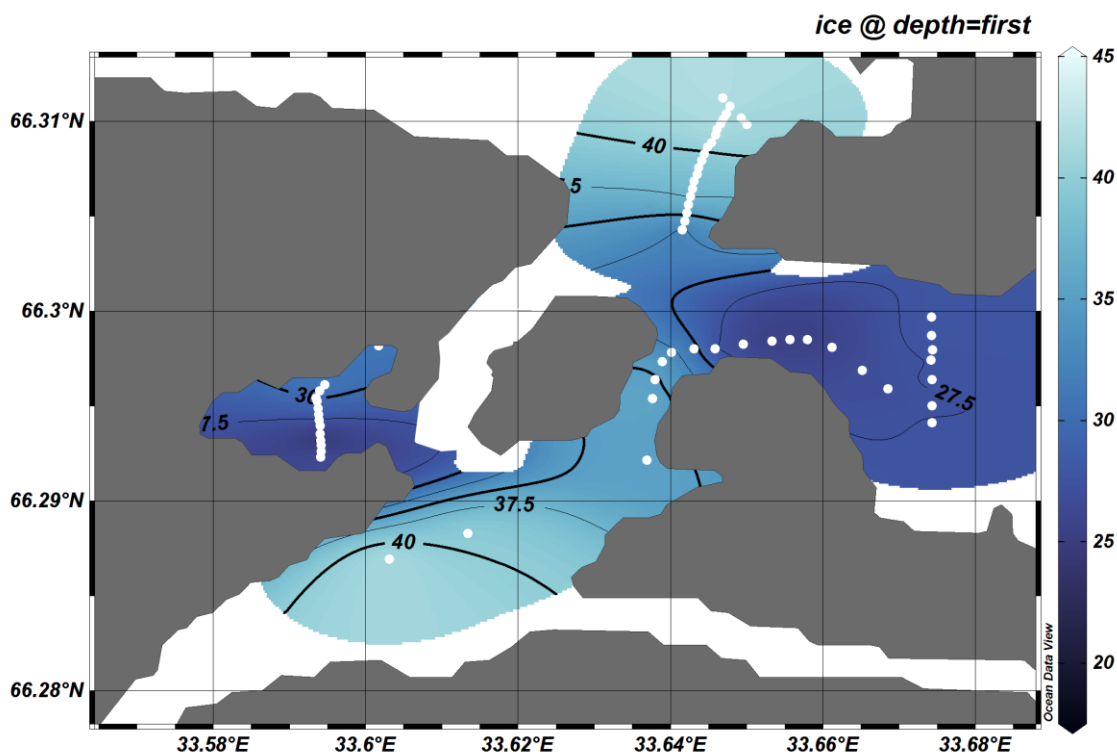


Рис. 3.47. Вертикальные профили температуры и солёности в лагуне Колюшковая (слева) и проливе Сухая Салма (справа), 15.03.23 14:00.

Из-за мягкой зимы 2022-2023гг. в марте 2023 годане удалось выполнить такую же обширную съемку ледяного и снежного покрова, как в 2021г.



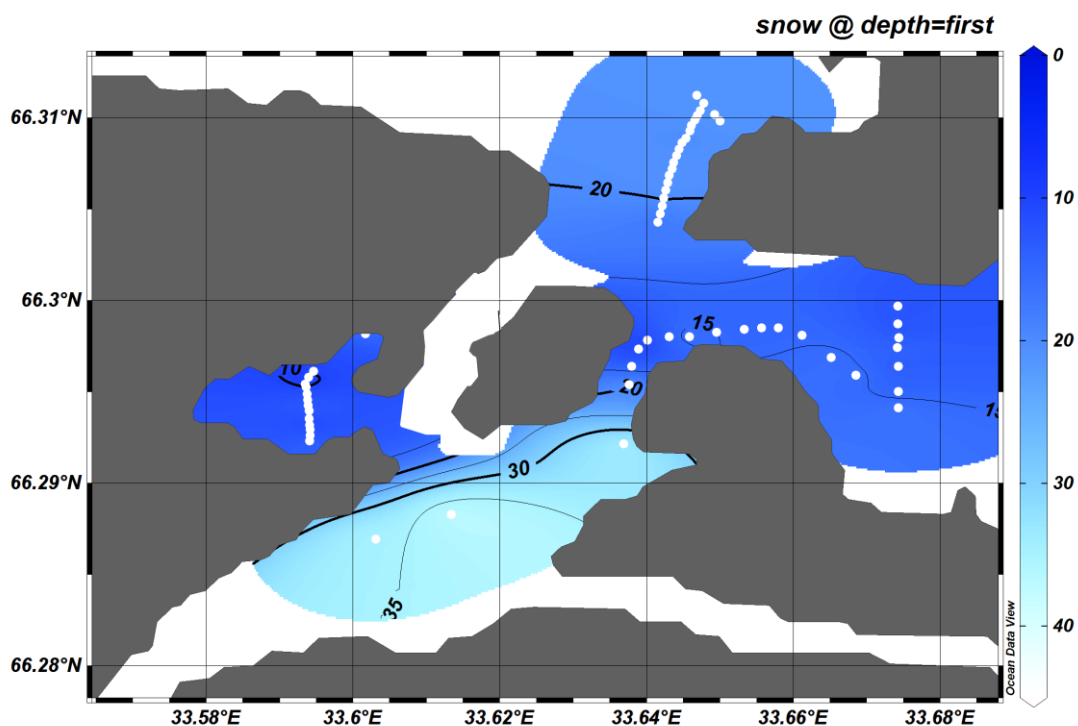


Рис. 3.48. Распределение толщин льда (сверху) и снежного покрова (снизу) в устьевой области р. Кереть, 14-16.03.2023.

Распределение снега и льда имеет схожие черты, что и в 2021г. (рис. 3.42) Более тонкий лед наблюдается в открытых частях, а в проливах за островами лед более толстый, при этом в губе Лебяжья был такой же тонкий лед, как и в Большом Керетском Рейде. Распределение снежного покрова было другое. Максимальные значения наблюдались в губе Кереть, а минимальные в Большом Керетском Рейде.



Таким образом, на основе всего вышесказанного в данной главе можно выделить следующие особенности термохалинной изменчивости рассматриваемых объектов:

1. Лагуна Колюшковая.

- Воды стратифицированы по температуре и солености
- Заток вод из моря происходит только во время сизигийного прилива в полную воду.
- Воды в лагуне более соленые и теплые в летний сезон

2. Губа Лебяжья.

- Воды в губе Лебяжья, в основном стратифицированы, но поверхностные слои могут быть хорошо перемешанными
- Воды губы Лебяжья менее соленые и более теплые, за счет чего видно распространение воды из открытого моря во время прилива и распространение вод губы Лебяжья в сторону открытого моря во время отлива
- Воды в заливе Амазона более теплые и менее соленые в летний сезон и более холодные и менее соленые в зимнее время года по сравнению с губой Лебяжья

3. Губа Летняя

- Воды в губе стратифицированы по температуре
- За счет стока р.Летняя в губу Летняя пресные воды распространяются по поверхности активно перемешиваясь с солеными поверхностными водами губы.
- Пресная вода не попадает в открытое море за пределами губы
- Мелководность губы является препятствием для затока глубинных соленых и холодных вод в губу
- В середине губы образуется перемешанный слой с благоприятной температурой для гидробионтов

По результатам всех наблюдений была составлена таблица с характеристиками вод, наблюдавшихся во время измерений:

Таблица 3.1 Характеристик слоев воды в летний (сверху) и зимний (снизу) сезоны в рассматриваемых объектах по результатам наблюдений 2017-2023 гг. (Верхняя половина таблицы – температура [°C], нижняя половина таблицы – соленость [‰]).

	губа Летняя	Лебяжья	залив Амазона	лагуна	Сухая Салма
верхний	18-20 °C (0-3 м)	14-21°C -0,5 .... -0,4°C(0-2 м)	19-20°C -0,8....-0,6°C (0-3 м)	10-25°C -1....-0,2°C (0-2 м)	6-13°C -0,7....-0,2°C (0-2 м)
промежуточный	7-18°C (3-20 м)	12-18°C -0,4°C(2-6 м)	-	-	3-12°C -0,55... -0,2°C(2-6 м)
придонный	<7 °C (>20 м)	<12-17°C(>6 м)	18-19°C -0,6....-0,5°C(3-5 м)	9-22°C -0,8....1°C(2-4 м)	2-11°C -0,55.... -0,4°C(>6 м)
верхний	10-22 (0-2 м)	15-20 19-24 (0-2 м)	14-16 21-23 (0-3 м)	12-26 16-27 (0-2 м)	16-24 9-26(0-2 м)
промежуточный	22-25 (3-20 м)	17-22 24-25(2-6 м)	-	-	22-25 26-27(2-6 м)
придонный	>25 (>20 м)	>25(>6 м)	16-17 23(3-5 м)	23-28 24-28(2-4 м)	>23-25 26-27(>6 м)

Из таблицы 4.1 видно, что диапазон изменчивости температуры наибольший у лагуны Колюшковая и пролива Сухая Салма. Это связано с наиболее полными данными по данным акваториям. Однако, в целом видно, что залив Амазона и лагуна Колюшковая прогреваются сильнее, однако в заливе Амазона наблюдается распреснение воды. Также хорошо видно, что в губу Лебяжья практически не попадают соленые воды из открытого моря, за счет чего соленость более 25‰ наблюдается только глубже 6 м летом и глубже 2 м зимой.

## **Глава 4. Влияние термохалинных условий на экосистемы полуизолированных приливных акваторий**

Воды Мирового океана и морей создают пространство для жизни и развития гидробионтов от поверхностных слоев до дна. Следы жизни можно найти во всей толще вод Мирового океана. Однако количественное и видовое распределение зависит от влияния различных факторов среды: интенсивности освещения, концентрации биогенных элементов, температуры, солености, гидростатического давления и др. В данной работе, в первую очередь, рассматривается влияние термохалинных условий на гидробионтов.

Температурный фактор может как ограничивать распределение гидробионтов, так и вынуждать их приспосабливаться, формируя, например, разновидность популяций одного вида. Горизонтальное и вертикальное распределение температуры может формировать различные условия обитания, которые более или менее благоприятны для разных гидробионтов. (Биология океана, 1977).

Распределение концентрации солености очень велико в Мировом океане от пресноводной (<0,5‰) и олигогалинной (0,5-3‰) до эвгалинной (30-40‰) и гипергалинной (>40‰) зон. Соленость Белого моря в исследуемом районе можно отнести к мезогалинной (5-18‰) и полигалинной (18-30‰) зоне. Распределение солености определяет следующие факторы водной среды: общая осмотическая концентрация, соотношение ионов, растворимость газов, плотность, вязкость воды (Биология океана, 1977).

Следует выделить особенности арктических водных экосистем, так как в таких экосистемах влияние условий водной среды отличается от экосистем более теплых поясов. Главная особенность арктических экосистем – цикличность ее функционирования за счет сильных отличий между теплым и холодным сезоном. В качестве главных отличий арктических сообществ можно отметить следующие их свойства: высокая численность популяции, гибкая реакция на неблагоприятные изменения среды, значительная скорость роста численности при благоприятных условиях и высокая смертность. Кроме того, сезонные условия могут отличаться друг от друга. Так, например, для Белого моря выделяются три типа зим: умеренные, суровые и мягкие зимы в зависимости от ледовых условий (Наблюдения за ледовой обстановкой, 2009). Амплитуда средних температур воздуха во время таких зим может достигать значений до 7°C. Таким образом, можно наблюдать различную реакцию беломорских экосистем во время разных типов зим. Температура в арктических экосистемах играет одну из важных ролей, поскольку за счет

нее обеспечивается экологическая дифференциация и «стратегия выживания». Так, например, для придонных видов арктических сообществ постепенное увеличение температуры в весенний сезон позволяет регулировать сроки размножения, что дает возможность регулярного снабжения потомства пищей. В то же время и на поверхности наблюдаются схожие процессы: развитие фитопланктона начинается в разных частях акватории, за счет чего возникает чередование пиков максимальной численности.

#### 4.1 Губа Летняя

Напомним, что губа Летняя – это морской залив, расположенный ближе всего к открытой части Белого моря из рассмотренных акваторий. В губу впадает р. Летняя – короткая и маловодная река. На выходе из губы Летняя расположен небольшой остров. Ширина губы постепенно уменьшается от моря к кутовой части, образуя в западной ее части узкий залив, которые впоследствии может быть отделен от моря. Губа Летняя не является постоянным объектом изучения, как океанологов, так и гидробиологов, поэтому данные по гидробиологии губы Летняя существуют только за 2001 год. Во время измерений были проведены отборы донных проб и анализ их бентосных сообществ.

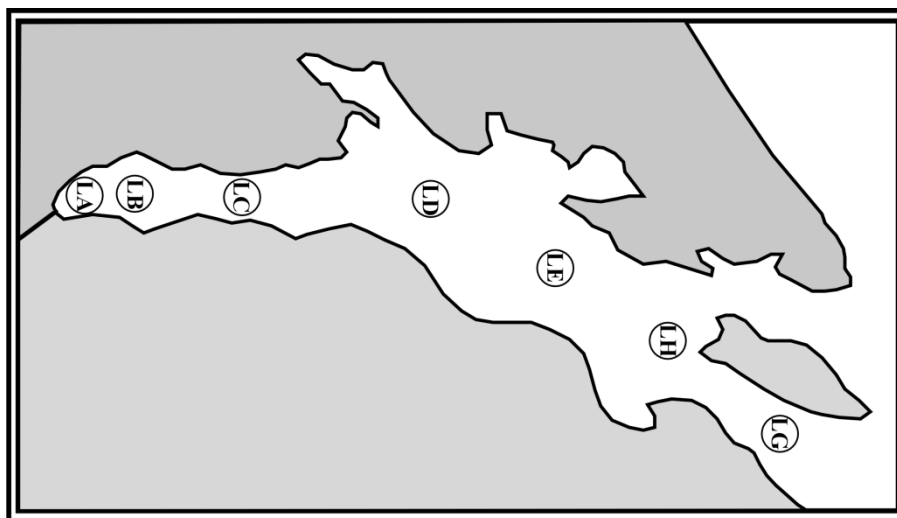


Рис. 4.1. Схема губы Летняя и расположение станций отбора проб бентоса (данные Иванова М.В.).

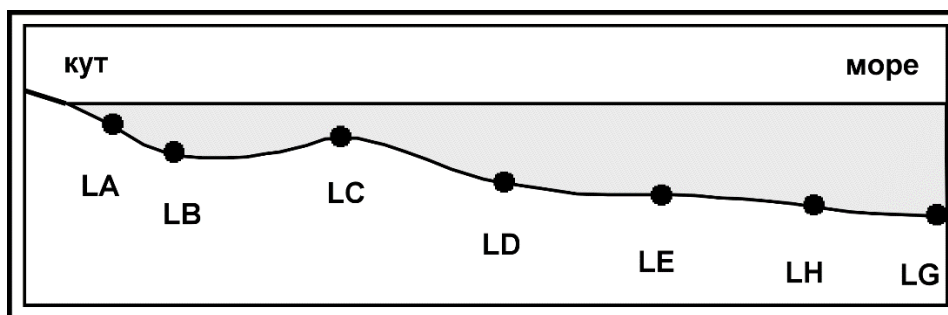


Рис. 4.2 Схема продольного разреза губы Летняя (данные Иванова М.В.).

Помимо определения видов бентоса рассчитывались и другие параметры: общая биомасса ( $\text{мг}/\text{м}^2$ ), число видов и индекс Шеннона, который характеризует биоразнообразие (формула 4.1).

$$H' = -\sum p_i \ln p_i; \quad (4.1)$$

Где  $p_i = n_i/N$ ;  $n_i$  – численность  $i$ -го вида (экз.),  $N$  – общая численность видов.

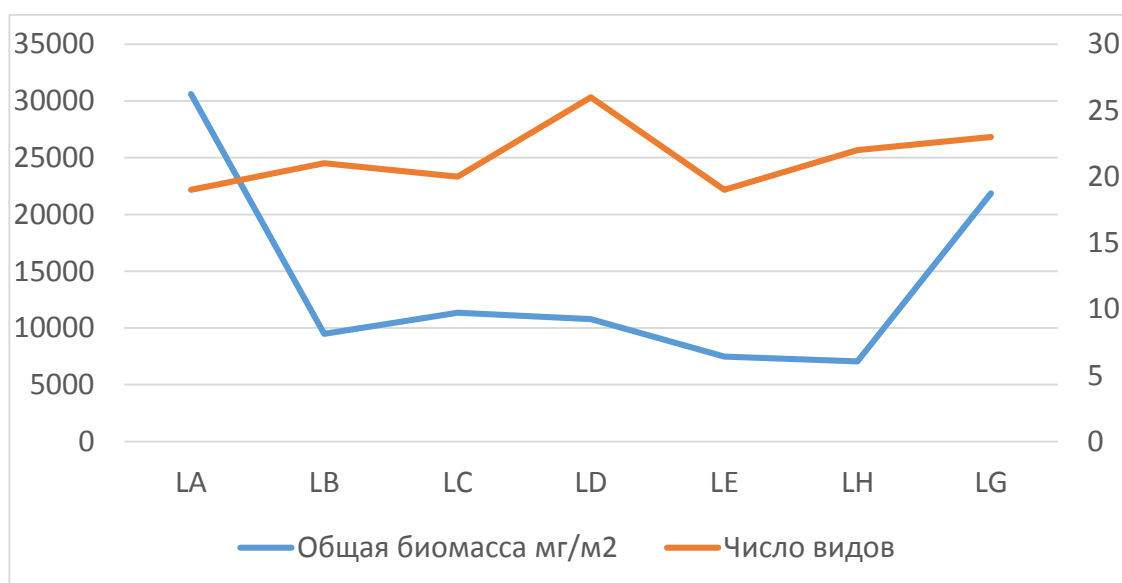


Рис. 4.3 Общая биомасса и число видов в губе Летняя, лето 2000г. Буквами обозначены пункты отбора донных проб в соответствии с рис. 4.1-4.2.

Из рис. 4.3 видно, что наибольшее число видов наблюдалось в средней части губы, расположенной равноудаленно от мористой и от кутовой части. При этом максимальные значения биомассы были наоборот в кутовой и мористой части губы. При этом в точке LA (кутовая часть) доминировал вид *Terebellides stroemi*, многощетинковые черви которых можно отнести к морским эвригалинным сублиторальным видам, а в мористой части губы Летняя в точке LG - *Lumbrinereis fragilis*, вид полихет, который часто можно найти на шельфе и мелководье арктических морей. В центральной части губы, где также

доминировал вид *Terebellides stroem*, разнообразие видов максимально. Возможно, это означает, что термохалинные условия в этой части губы наиболее благоприятные. Это соответствует моменту наблюдений в июле 2022 г. (рис. 3.40). Температура составила 17-20°C, соленость 20-24‰. Благоприятные условия достигаются за счет оптимальных для развития видов глубин до 18-20 м: воды не перегреваются, как в кутовой части губы, и не охлаждаются, как это происходит в мористой части вследствие притока холодных вод из открытого моря, а постоянство концентрации солености обеспечивается медленным притоком вод из поверхностного слоя открытой части моря и малым расходом р. Летняя в летний сезон.

## 4.2 Губа Лебяжья

Губа Лебяжья, как и губа Летняя, расположена внутри материкового массива, однако она находится дальше от открытой части моря и закрыта от нее островами. Губа Лебяжья мелководна (средняя глубина составляет около 6 м) и ограничена узкой перемычкой, отделяющей ее от пролива Подпахта. В самой губе имеется свой небольшой мелководный залив – Амазона, отделенный от основной акватории губы каменистой перемычкой. Поэтому изменение температуры и концентрации солености в губе Лебяжья не так ярко выражено, как в более открытых частях данной части акватории Кандалакшского залива.

Особенностью губы Лебяжьей является встречаемость в ней трехиглой колюшки (*Gasterosteus aculeatus*), которая занимает важную роль в экосистеме Белого моря (Лайус и др, 2013). Время нереста трехиглой колюшки – конец мая – июнь. В этот период колюшка подходит к различным берегам Белого моря для откладки икры, которая вместе с появляющейся из нее молодью входит в рацион различных хищных рыб. Одно из мест обитания трехиглой колюшки, где ее плотность высока во время нереста, – это лагуна Колюшковая, расположенная севернее губы Лебяжья и являющаяся полуизолированным приливным водоемом. Однако в губе Лебяжья трехиглую колюшку также можно обнаружить, и здесь ее плотность составляет около 7,7 экз/м<sup>2</sup> (Бахвалова и др., 2017) или 8.1 экз/м<sup>2</sup> (Rybkina et al, 2017). В отличие от губы Лебяжьей, в лагуне Колюшковой плотность трехиглой колюшки значительно выше и достигает 42,7 экз/м<sup>2</sup>, однако в других акваториях, не рассматриваемых в данной работе плотность колюшки может достигать значений более 100 экз./м<sup>2</sup>. Отчасти на такую высокую разницу в значениях влияет растительность, в которой трехиглая колюшка предпочитает откладывать икру. В губе

Лебяжья литораль представляет собой илисто-песчаный пляж, где трудно укрыть свое гнездо от хищников и своих сородичей, а в лагуне Колюшковая есть много нитчатых водорослей и небольшое количество зоостеры, в которых удобно скрывать свое гнездо.

Кроме того, сравнивая влияние термохалинных условий, можно отметить, что в губу Лебяжья за счет отсутствия физической перемычки чаще проникают холодные и соленые воды вместе с приливом: морские холодные воды на глубинах 2-4 м хорошо видны в правых частях рисунков 3.40-3.41, 3.43. Однако помимо термохалинных факторов для губы Лебяжья следует учесть и динамический фактор. Течения в мористой части губы Лебяжья составляют 20 см/с и уменьшаются в направлении с востока на запад, так что в кутовой части губы Лебяжья не превышают 1 см/с (Ионов и др., 2015). Такие невысокие скорости течений приводят к образованию застойных явлений, выпадению илистых осадков и образованию мелководий с отсутствием растительности – биотопа мало пригодного для нереста колюшек. Так же невысокие скорости течений благоприятствуют оседанию многих личинок донных беспозвоночных, например, моллюскам *Mytilus edulis*. В 2007 г. были проведены эксперименты в проливе Подпахта, расположенном чуть восточнее губы Лебяжья (напротив входа в губу). Эти эксперименты показали, что при скоростях течений до 2,5 см/с скорость обрастания моллюсками экспериментальных пластин значительно выше, чем при более высоких скоростях, достигающих 10,2 см/с. Плотность моллюсков *Mytilus edulis* в конце эксперимента составили 66160 экз./м<sup>2</sup> и 15440 экз./м<sup>2</sup> для низких и высоких скоростей течения соответственно (Раилкин и др, 2012).

#### **4.3 Лагуна Колюшковая**

Лагуна Колюшковая, будучи полуизолированной акваторией, является подходящим местом для нереста и развития многих рыб, в т. ч. трехиглой колюшки, которая играет важную роль в экосистеме Белого моря за счет места в трофической цепи, которое расположено между хищными рыбами и зоопланктоном. Местом нереста для трехиглой колюшки являются зоостера, нитчатые водоросли, фукусы (бурые водоросли) и скалы, из которых преобладают первые три категории. При этом в зоостере наблюдается всегда большая плотность трехиглой колюшки, чем в фукусах (рис. 4.4).

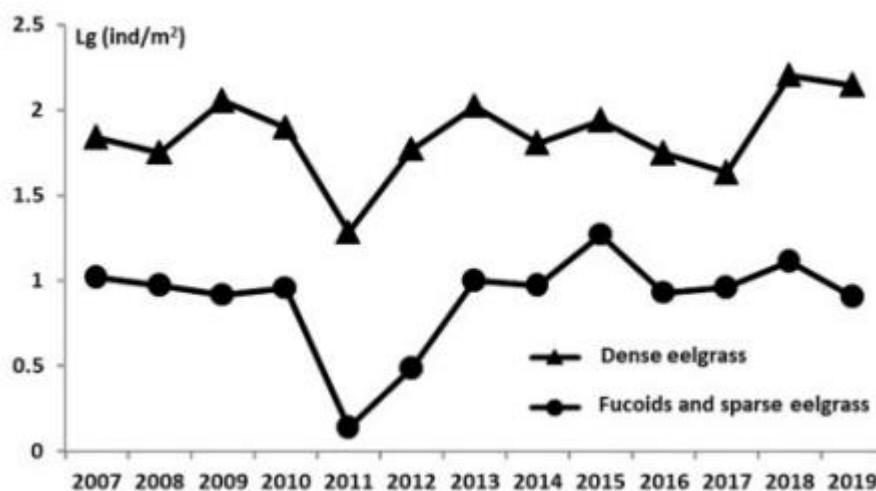


Рис. 4.4 Межгодовая динамика плотности [экз./м<sup>2</sup>]трехиглой колюшки в двух типах местообитаний (Lajus et al, 2020)

Одно из отличий лагуны Колюшковой – сильное развитие нитчатых водорослей, разрастающихся в летнее время, в которых нерестится колюшка. Общая количество макрозообентоса (экз/м<sup>2</sup>) в лагуне больше в 9-10 раз по сравнению с прилегающими мористыми участками. Согласно температурной регуляции в лагуне наблюдаются пики развития следующих видов зоопланктона: личинок *Gastropoda* (в начале лета), копепода *Acartia longiremis* (в момент максимального прогрева воды). При этом общая численность зоопланктона в первой половине лета в несколько раз выше в лагуне Колюшковой, чем в проливе Сухая Салма (напротив лагуны).

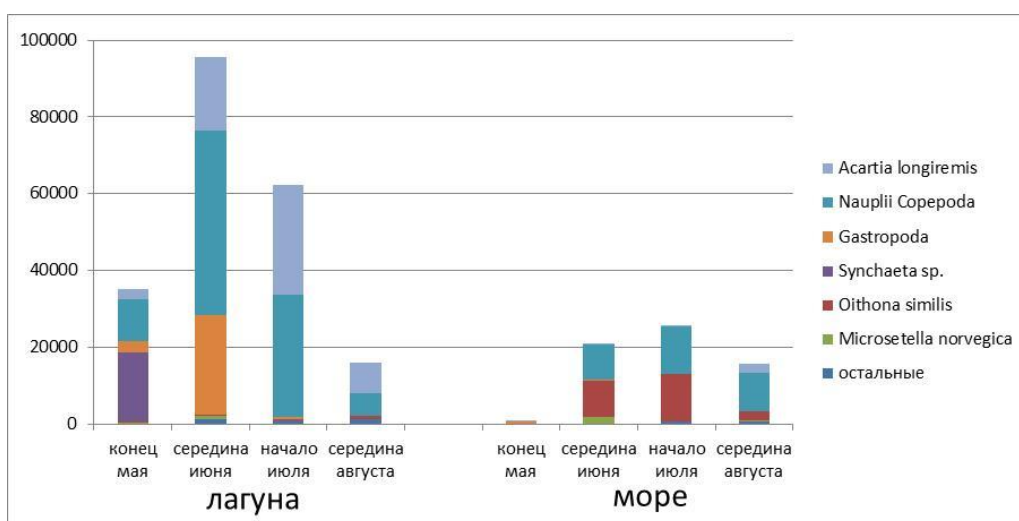


Рис. 4.4. Численность (экз./м<sup>3</sup>) массовых видов зоопланктона в течение лета 2016 в лагуне Колюшковая (лагуна) и соседней морской акватории пролив Сухая Салма (море) (данные Иванова М.В.)



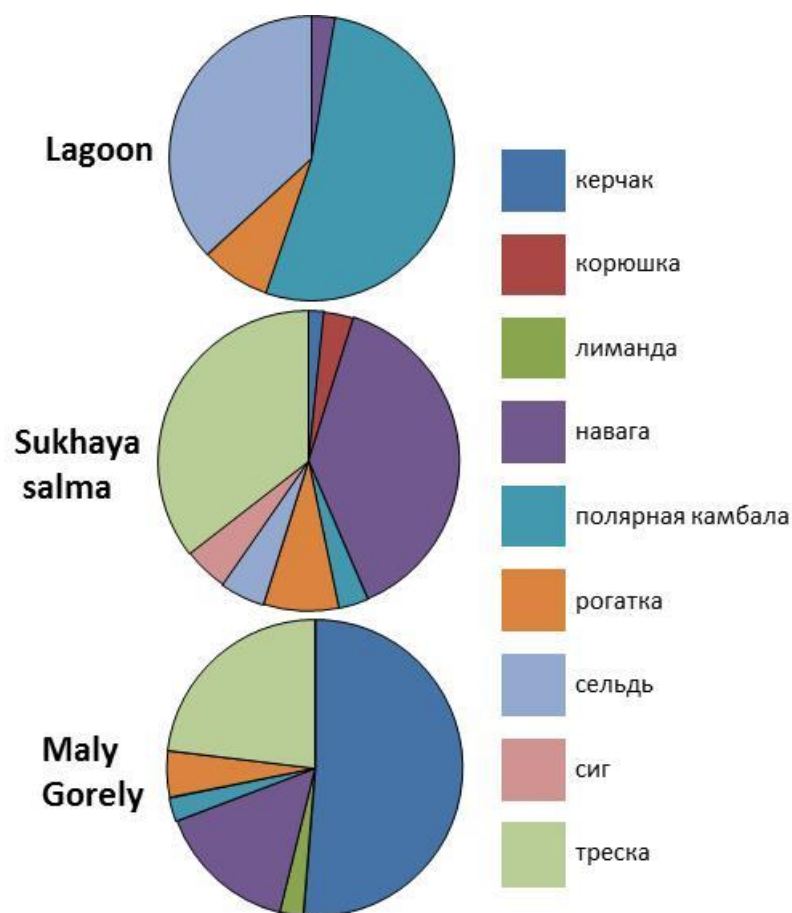


Рис. 4.5 Структура сетных уловов рыб в лагуне Колюшковая и в соседних морских акваториях (данные Иванова М.В.).

Поскольку лагуна Колюшковая является полуизолированным приливным водоемом, внутри нее почти не наблюдается хищных видов рыб, что способствует меньшему выеданию трехиглой колюшки во время первых месяцев жизни. Нерест является важным этапом в жизни трехиглой колюшки. Беломорская популяция трехиглой колюшки нерестится всего один раз в период с конца мая по вторую половину июня. Основным «сигналом» начала нереста служит повышение температуры воды до 10-12°C. Во время нереста средние многолетние численности трехиглой колюшки больше в прибрежных частях пролива Сухая Салма, чем у берега лагуны Колюшковая (около 7 экз/м<sup>2</sup> против 15 экз/м<sup>2</sup>), однако на выходе из лагуны, рядом с рукотворной перемычкой, численности колюшки максимальны и составляют 23,2 экз/м<sup>2</sup> (рис. 4.6). На рисунке 4.6 показаны средние многолетние численности трехиглых колюшек в середине нереста в лагуне Колюшковая и близлежащей акватории. Из рис. 4.6 видно, что в лагуне далеко не все места подходят для нереста трехиглой колюшки, за счет чего наблюдается разница в ее плотности: от 6, 5 до 23,2 экз/м<sup>2</sup>.

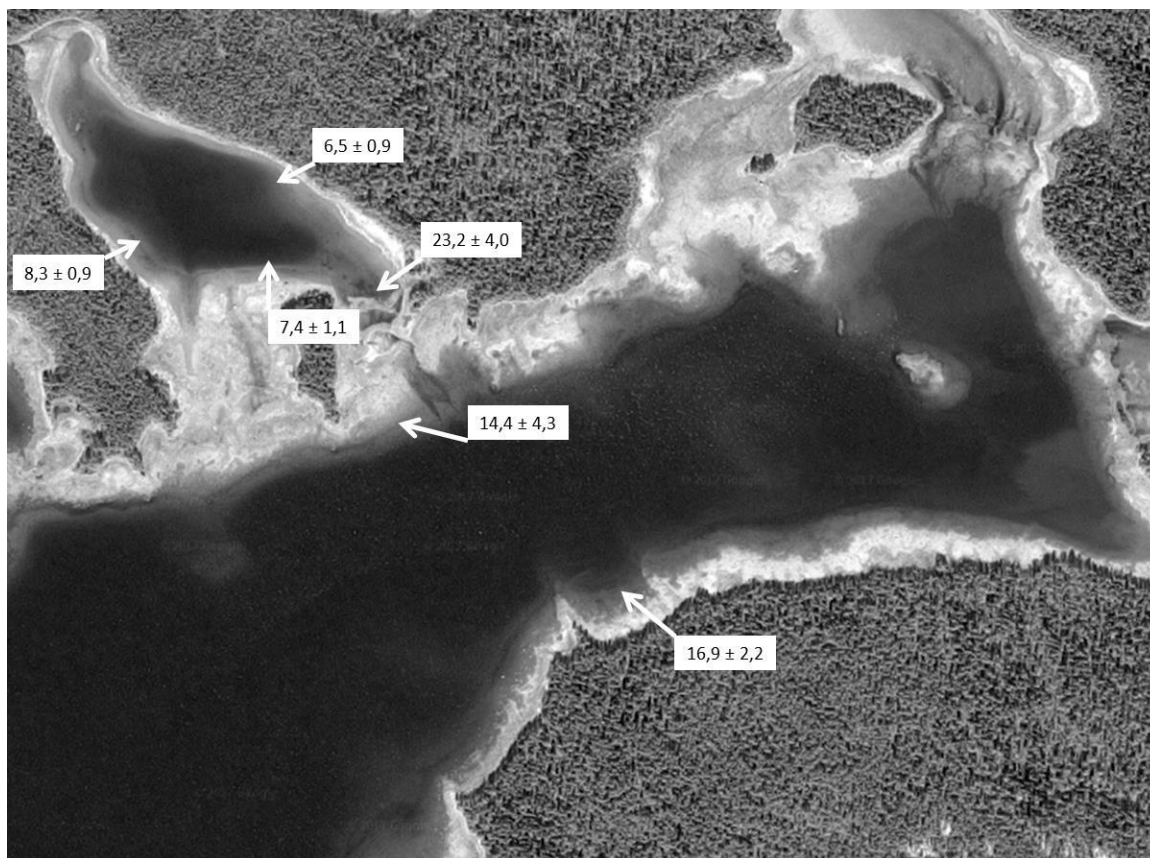


Рис. 4.6. Средние многолетние численности (экз./м<sup>2</sup>) трехиглых колюшек в середине нереста в лагуне Колюшковая, 2015-2018 (данные из Golovin et al., 2019) и в проливе Сухая Салма, 2016-2018 (данные Иванова М.В.)

К концу теплого сезона в августе (по данным 2016-2018 гг.) численность молоди колюшки достигала более 50 экз./м<sup>2</sup> в лагуне Колюшковой. Для сравнения: в Сухой Салме численность молоди колюшки составляла менее 1 экз./м<sup>2</sup>. При этом размеры молоди в августе тоже отличаются: в лагуне Колюшковая молодь более крупная, чем в проливе Сухая Салма. На рисунке 4.7 показана межгодовая изменчивость размеров молоди в лагуне Колюшковая и проливе Сухая Салма в середине августа за 2016-2018 гг.

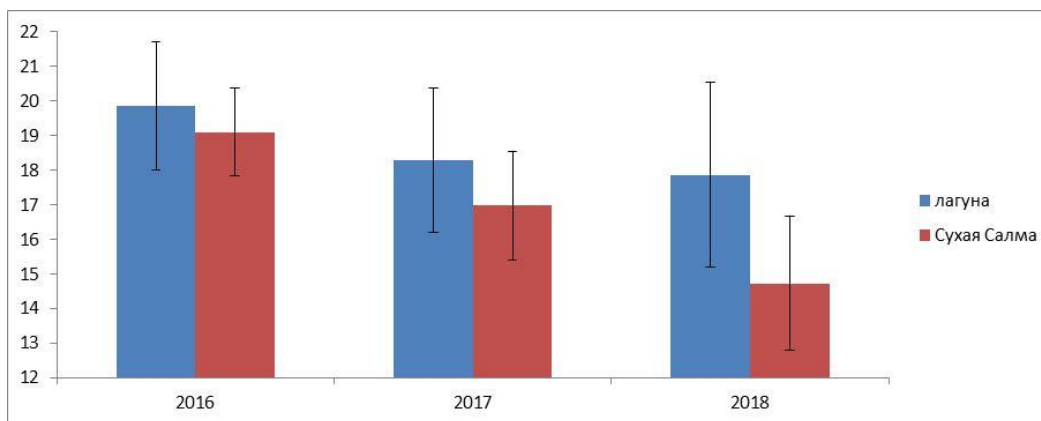


Рис. 4.7 Размеры молоди колюшки (мм) в лагуне Колюшковая и проливе Сухая Салма в середине августа в 2016-2018 гг. (данные Иванова М.В.)

Из рис. 4.7 видно, что размеры молоди трехиглой колюшки к концу теплого сезона всегда выше в лагуне Колюшковая, чем в проливе Сухая Салма. Также можно отметить снижение средних размеров молоди трехиглой колюшки в середине августа в период 2016-2018 гг.: так для лагуны Колюшковая средние размеры молоди трехиглой колюшки снизились с 20 мм до 18 мм, а для пролива Сухая Салма с 19 мм до 14 мм.

Из-за ограниченности связи лагуны Колюшковая с морем у нее гораздо менее выражены приливо-отливные колебания. Это приводит к более стабильным термохалинным условиям, образованию обширных хорошо прогреваемых мелководий, более высоким летним температурам. В целом это благоприятно сказывается на количественном развитии бентосных и планктонных организмов. Трехиглая колюшка, возможно, в силу трудности проникновения в лагуну, не образует в ней таких массовых нерестовых скоплений, как в густых зарослях zostеры, в других губах Белого моря. Но, ряд особенностей: отсутствие хищников, летний прогрев, хорошая кормовая база снижают смертность колюшек и благоприятствуют более быстрому росту молоди.

#### 4.4 Особенности измерений в летний и зимний сезоны

По результатам прошедших полевых измерений 2017 – 2023 гг. можно составить карты с температурными диапазонами для зимнего и летнего сезонов. Из рассматриваемых объектов можно сравнить лагуну Колюшковую с проливом Сухая Салма (рис. 4.8) и губу Лебяжья с заливом Амазона (рис. 4.12).

Рассмотрим разницу температур в летнее и зимнее время лагуны Колюшковая и пролива Сухая Салма (рис. 4.8).

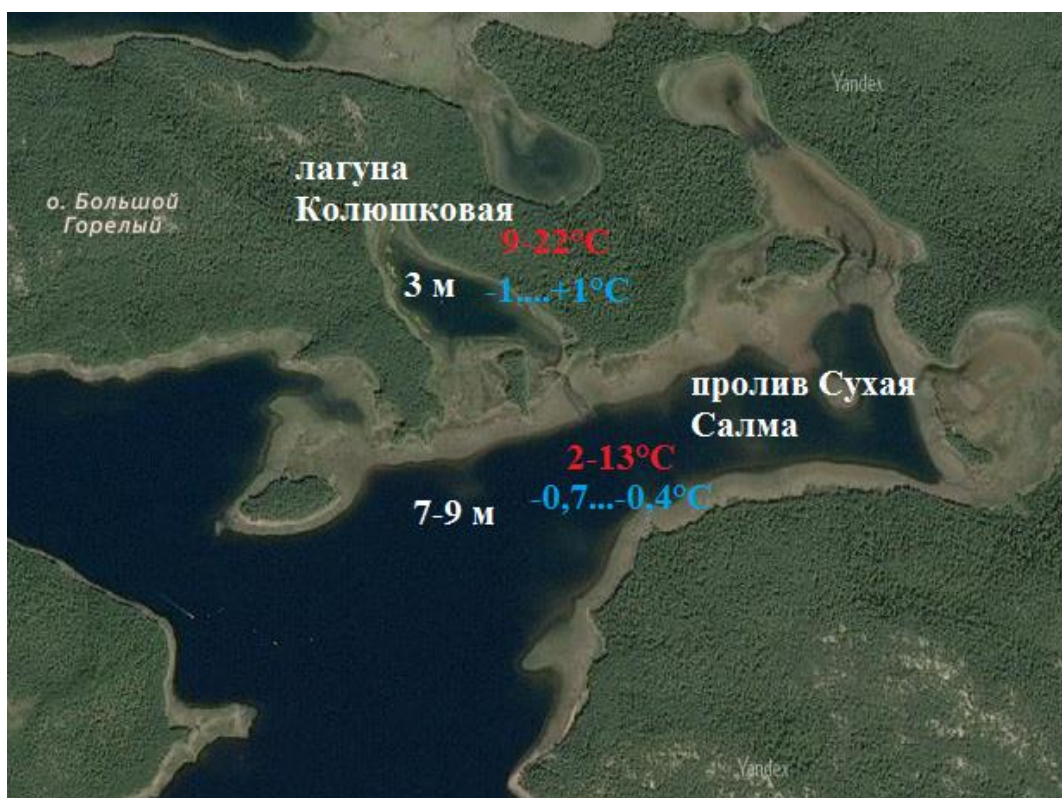


Рис. 4.8 Диапазоны летних и зимних температур в проливе Сухая Салма и лагуна Колюшковая, Кандалакшский залив, Белое море (снимок Яндекс.Карты).

Видно, что воды в лагуне прогреваются сильнее в теплое время года и охлаждаются сильнее в холодное время года. Трехиглая колюшка достаточно неприхотлива и может жить в широком температурном и галинном диапазоне. Однако для начала нереста воды все-таки должны прогреться до определенной температуры (около 10-12°C). Несмотря на то, что воды в лагуне прогреваются сильнее и быстрее и во время нереста численность колюшки на выходе из лагуны больше, чем в проливе Сухая Салма, средняя многолетняя численность трехиглой колюшки в лагуне Колюшковая составляет  $9,2 \pm 1,9$  экз/м<sup>2</sup>, а в проливе Сухая Салма  $9,0 \pm 1,2$  экз/м<sup>2</sup> по результатам мониторинга 2015-2022 гг. (данные Иванова М.В.).

Рассмотрим в качестве примера сравнение вертикальных профилей температуры и солености в лагуне Колюшковая и проливе Сухая Салма (рис. 4.9).

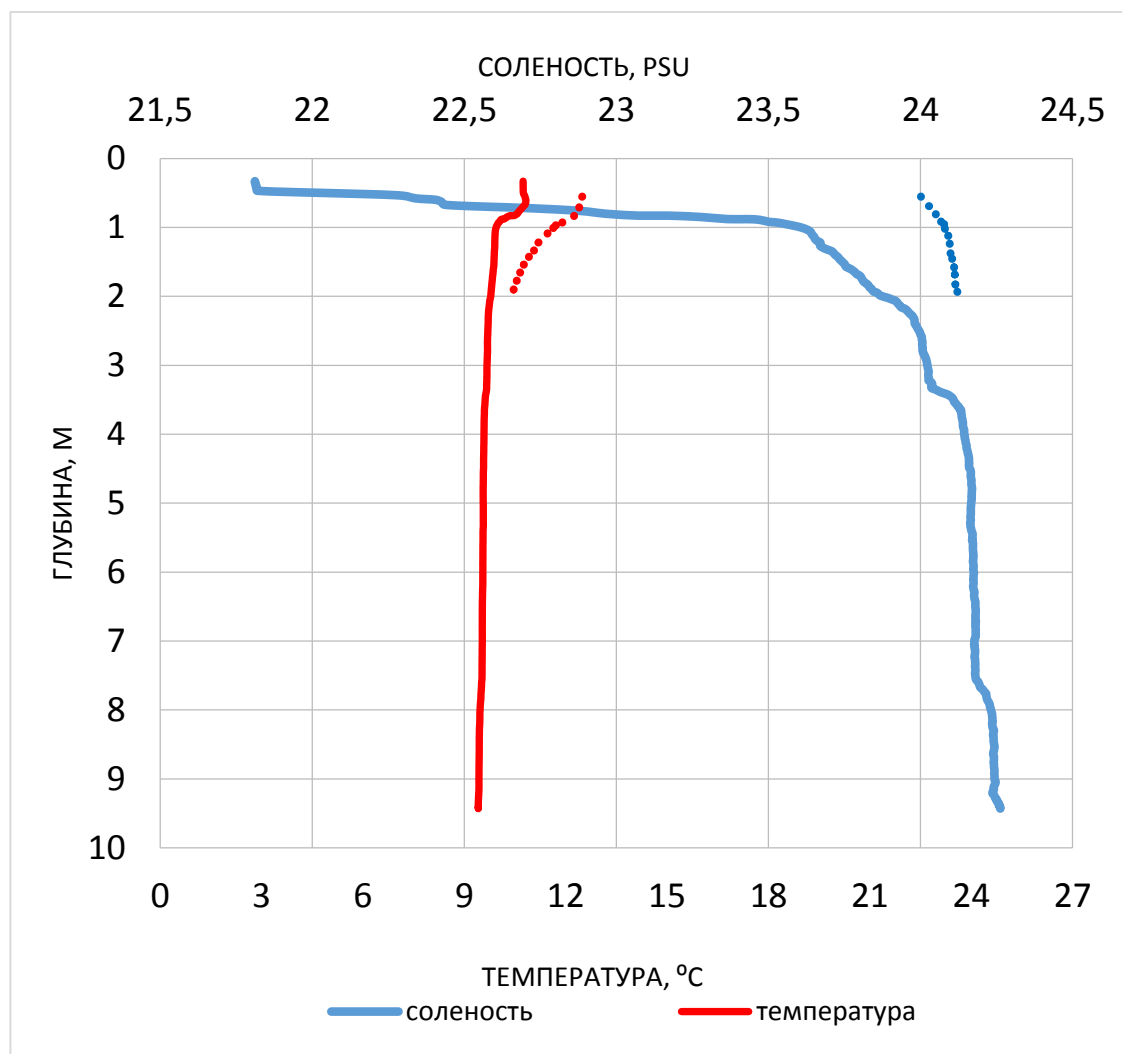


Рис. 4.9 Вертикальные профили температуры [°C] и солености [‰] в лагуне Колюшковая (пунктир) и проливе Сухая Салма (линия), июнь 2022 г.

Из рис. 4.9 видно, что воды в лагуне Колюшковая более теплые и соленые по сравнению с проливом Сухая Салма. Температура сильно влияет не на плотность колюшки, а на скорость развития икринок колюшки и рост молоди, так как при более высоких температурах, икринки развиваются быстрее и вместе с ними развиваются разные виды фито- и зоопланктона, которые являются кормовой базой для молоди. Поэтому в лагуне лучше кормовая база, чем в проливе Сухая Салма, и молодь колюшки успевает вырасти в лагуне до больших размеров (рис. 4.7). Соленость здесь роли не играет, поскольку трехиглую колюшку можно отнести к эвригалинным видам, которые могут жить в широких диапазонах изменчивости концентрации солености.

В конце августа-начале сентября трехиглая колюшка уходит обратно в открытое море. На зимовку в лагуне остается только та колюшка, которая не успела выйти из лагуны в конце теплого сезона. Зимний мониторинг лагуны Колюшковая показывает, что состав рыбного населения лагуны беден и сильно различается в разные года. Так, например, в марте 2017 г. было поймано на ловушку более 30 трехиглых колюшек, в то время как в марте 2018 г. всего несколько экземпляров корюшек, селедков и трехиглых колюшек. В марте 2020 г. было поймано на ловушку 10 селедков. В марте 2021 г. было поймано несколько трехиглых колюшек, а на следующий год было поймано на ловушку больше 30 девятииглых колюшек и ни одной трехиглой; в марте 2023 г. также не было поймано ни одной трехиглой колюшки (данные Иванова М.В.). То есть видно, что далеко не каждую зиму можно обнаружить в лагуне Колюшковая трехиглую колюшку.

В Белом море основное место зимовки рыб, даже недалеко от берега, это прослойка теплой воды на глубинах свыше 30-40 до 70-80 м. Здесь, даже к концу зимы температура воды остается положительной. Зимой на этих глубинах ловятся селедки, мойва, бычки и скаты (данные Иванова М.В.), но трехиглая колюшка, которая, по-видимому, уходит еще дальше в открытое море, пока не встречается. Глубины свыше 50-60 м можно встретить ближе к открытому морю, например, рядом с одним из рассматриваемых объектов - напротив губы Летняя. В марте 2021 г. был сделан вертикальный профиль температуры и солености в точке, расположенной напротив губы Летняя (рис.4.10).

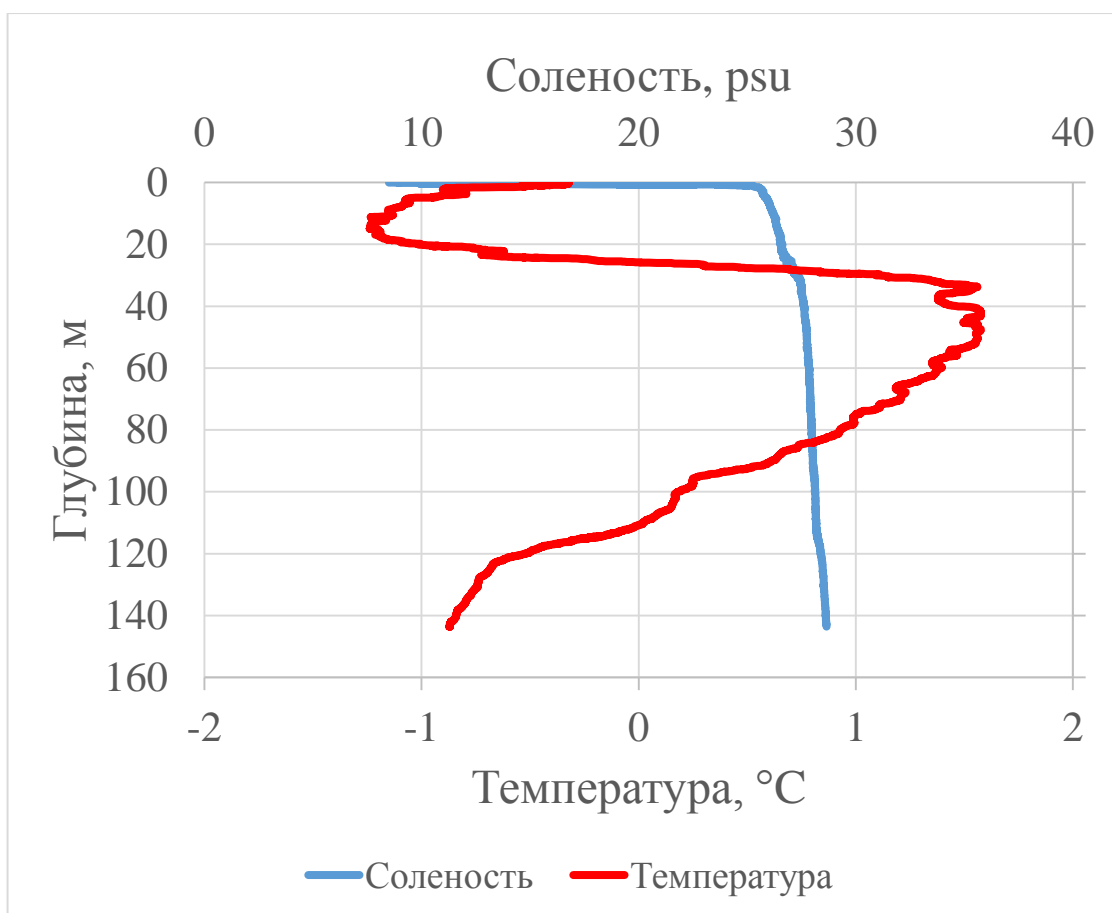


Рис. 4.10 Вертикальный профиль температуры [°C] и солености [%], точка напротив губы Летняя, март 2021 г.

На рис. 4.10 хорошо видна прослойка воды с температурой более 1°C, которая является приемлемой для зимовки рыб.

Таким образом, трехиглая колюшка во течение первых месяцев жизни в лагуне Колюшковая может быстрее развиваться, чем в проливе Сухая Салма, а далее, в конце теплого сезона, у колюшки есть два варианта: уйти из лагуны или остаться зимовать, причем, второй вариант вполне подходит для колюшки, так как в придонном горизонте может наблюдаться положительная температура (рис. 4.11).

Отметим, что зимние измерения температуры и солености в лагуне Колюшковая были сделаны впервые.

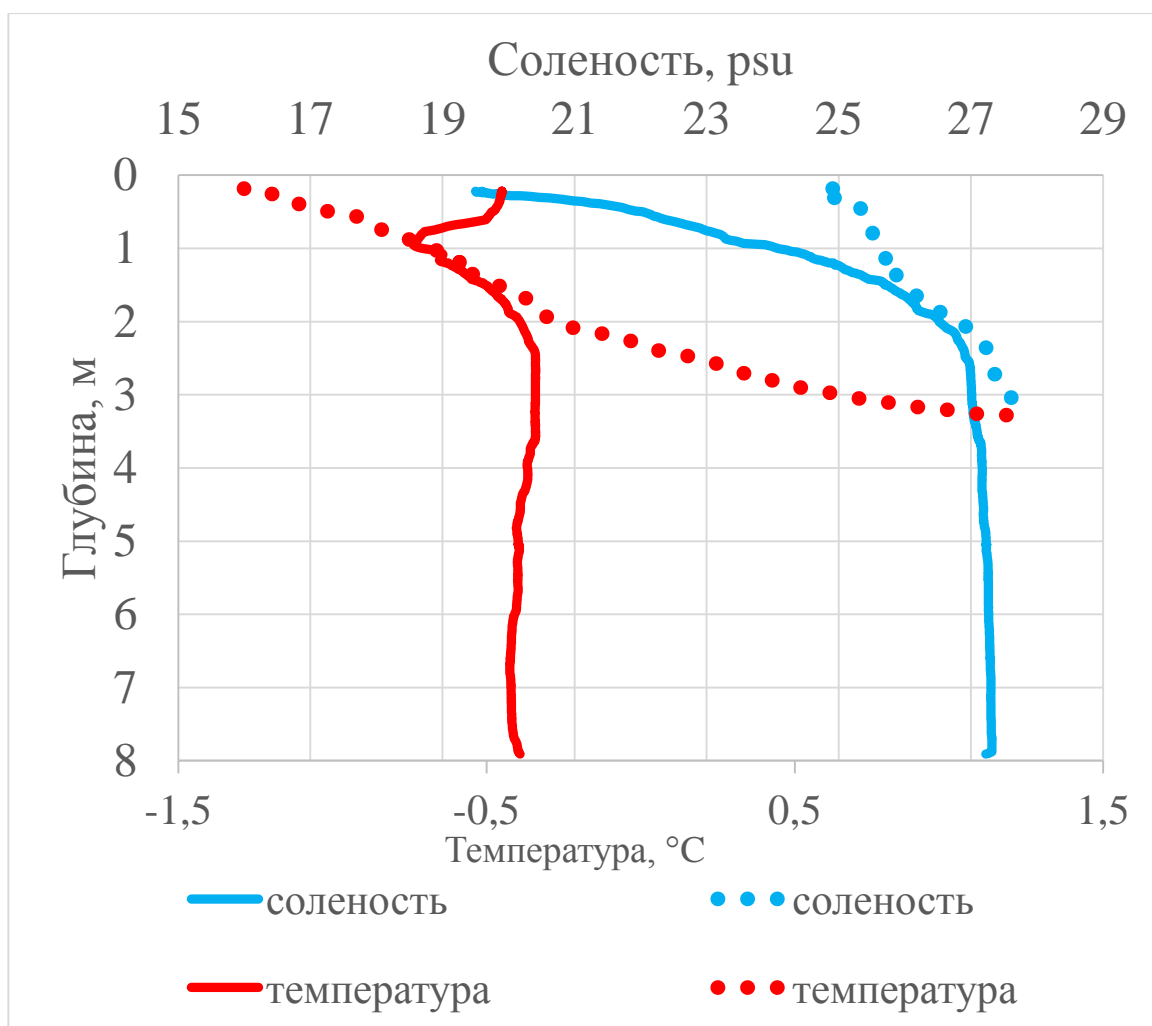


Рис. 4.11 Вертикальные профили температуры [°C] и солености [‰] в лагуне Колюшковая (пунктир) и проливе Сухая Салма (линия), март 2023 г.

Из рис. 4.11 видно, что в зимнее время воды в лагуне на поверхности более холодные, а на глубинах больше 1,5 м более теплые, чем в проливе Сухая Салма. Также воды в лагуне более соленые, как на ее поверхности, так и в придонном горизонте. Поскольку для трехиглой колюшки важно только наличие положительных температур, в лагуне Колюшковой могут создаваться нормальные условия, подходящие для зимовки трехиглой колюшки.

На рис. 4.12 представлена схожая схема с рис. 4.8 для губы Лебяжья и пролива Амазона, на который нанесены диапазоны температур для летнего и зимнего сезона по результатам наблюдений 2021 – 2023 гг. В этой части акватории наблюдается схожая картина с проливом Сухая Салма и лагуной Колюшковая: в заливе Амазона вода более прогретая в летний сезон, и более холодная в зимний сезон по сравнению с губой Лебяжья. Однако отличительной особенностью залива Амазона является наличие распресненных вод в летнее время со стороны кутовой его части (рис. 3.38).





Рис. 4.12 Диапазоны летних и зимних температур в губе Лебяжья и заливе Амазона, Кандалакшский залив, Белое море (снимок Яндекс.Карты).

Напомним, что основное отличие залива Амазона и губы Лебяжья от лагуны Колюшковой и пролива Сухая Салма в отсутствии физического барьера между ними, который полностью перекрывает водообмен. Однако, наличие узкой каменистой перемычки и расположение залива Амазона затрудняет попадание в него морских вод во время приливно-отливных движений, поэтому вода там гораздо теплее, чем в губе Лебяжья в теплый сезон, и холоднее в зимнее время.

Зимой, вследствие сильного выхолаживания и отсутствия перемычки вода в заливе Амазона холоднее на 0,1-0,2 °С (рис. 4.13), и в придонном горизонте не наблюдается тенденции к увеличению температуры, как в лагуне Колюшковая, поэтому для зимовки рыб залив Амазона не подходит.

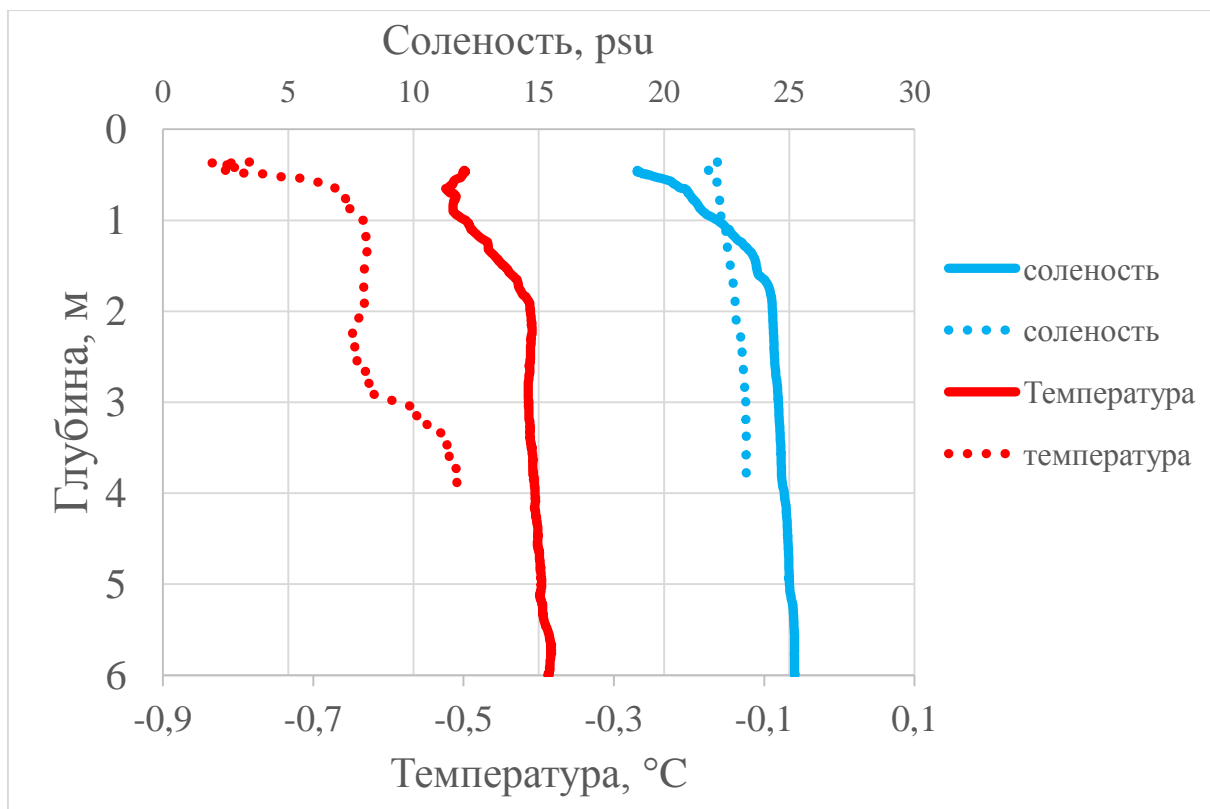


Рис. 4.13 Вертикальные профили температуры [°C] и солёности [‰] в губе Лебяжья (линия) и заливе Амазона (пунктир), март 2023 г.

Из рис. 4.13 видно, что воды в заливе Амазона более холодные по всей своей толще и более солёные на поверхности и менее солёные на глубинах больше 1 м, чем в губе Лебяжья. Охлаждение вод в заливе Амазона происходит за счет постоянного затока вод из губы Лебяжья во время приливно-отливных движений. Активное влияние динамического фактора видно в зимнее время: наблюдается отсутствие льда в перемычке между губой Лебяжья и заливом Амазона (рис. 4.14).



Рис. 4.14 Фото перемычки между заливом Амазона и губой Лебяжья, март 2023 г. (личный архив)

Зимой 2023 года были проведены измерения концентрации хлорофилла во льду и подледном горизонте (рис. 4.15).

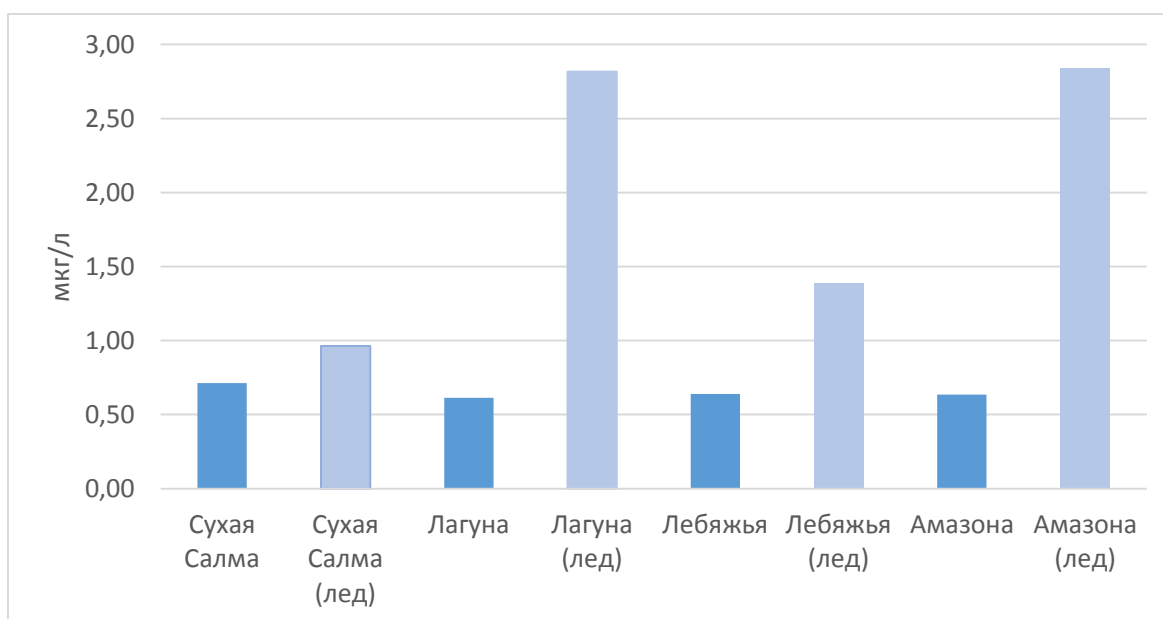


Рис. 4.15 Сравнение зимних концентраций хлорофилла [мкг/л] в разных актуаториях устьевой области р. Кереть, март 2023 г.

Из рис. 4.15 видно, что в разных частях исследуемого участка актуатории Кандалакшского залива концентрация хлорофилла примерно одинаковая и составляет около 0,6 мкг/л. Во льду концентрация хлорофилла больше в точках, представленных на рис. 4.15. Во всех остальных точках концентрация хлорофилла во льду составляет около 0,6 мкг/л. Далее

можно отдельно выделить две группы: лагуна Колюшковая и залив Амазона, пролив Сухая Салма и губа Лебяжья, где концентрации хлорофилла составляют более 2,5 мкг/л и около 1 мкг/л соответственно.

В летнее время воды в губе Лебяжья и заливе Амазона сильно отличаются друг от друга (рис 4.16), почти так же, как воды лагуны Колюшковой и пролива Сухая Салма.

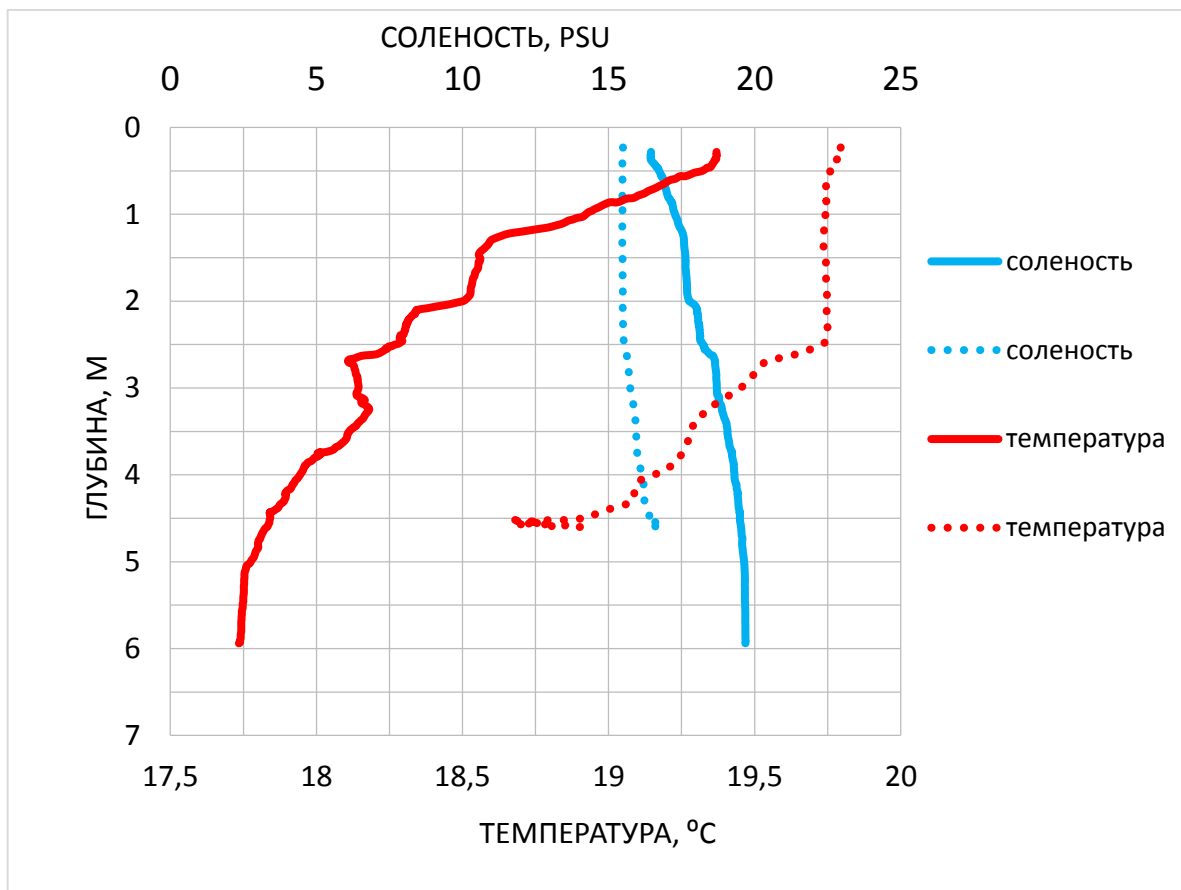


Рис. 4.16 Вертикальные профили температуры [°С] и солености [‰] в губе Лебяжья (линия) и заливе Амазона (пунктир), июль 2023 г.

Основное отличие здесь – небольшая распресненность вод в заливе Амазона. Из рис. 4.16 также видно, что воды в заливе Амазона сильнее прогреваются за счет его мелководности.

#### 4.5 Сравнение измерений в проливе Сухая Салма и лагуне Колюшковой за отдельные года в зимний и летний сезоны

Зимы на Белом море можно разделить на три группы: умеренные, суровые и мягкие (Наблюдения за ледовой обстановкой, 2009). В зимний сезон наблюдения в исследуемом районе проводились всего два раза: в марте 2021 года и марте 2023 года. Во время обработки результатов данных измерений оказалось, что данные зимы можно отнести к разным их типам по данным метеонаблюдений: суровая – зима 2021 г., мягкая – зима 2023 г. Поэтому представляет интерес сравнение вертикальной структуры вод в разные типы зим.

На рис. 4.17 представлено сравнение вертикальных профилей температуры и солености по результатам двух зим (март 2021 г. и март 2023 г.).

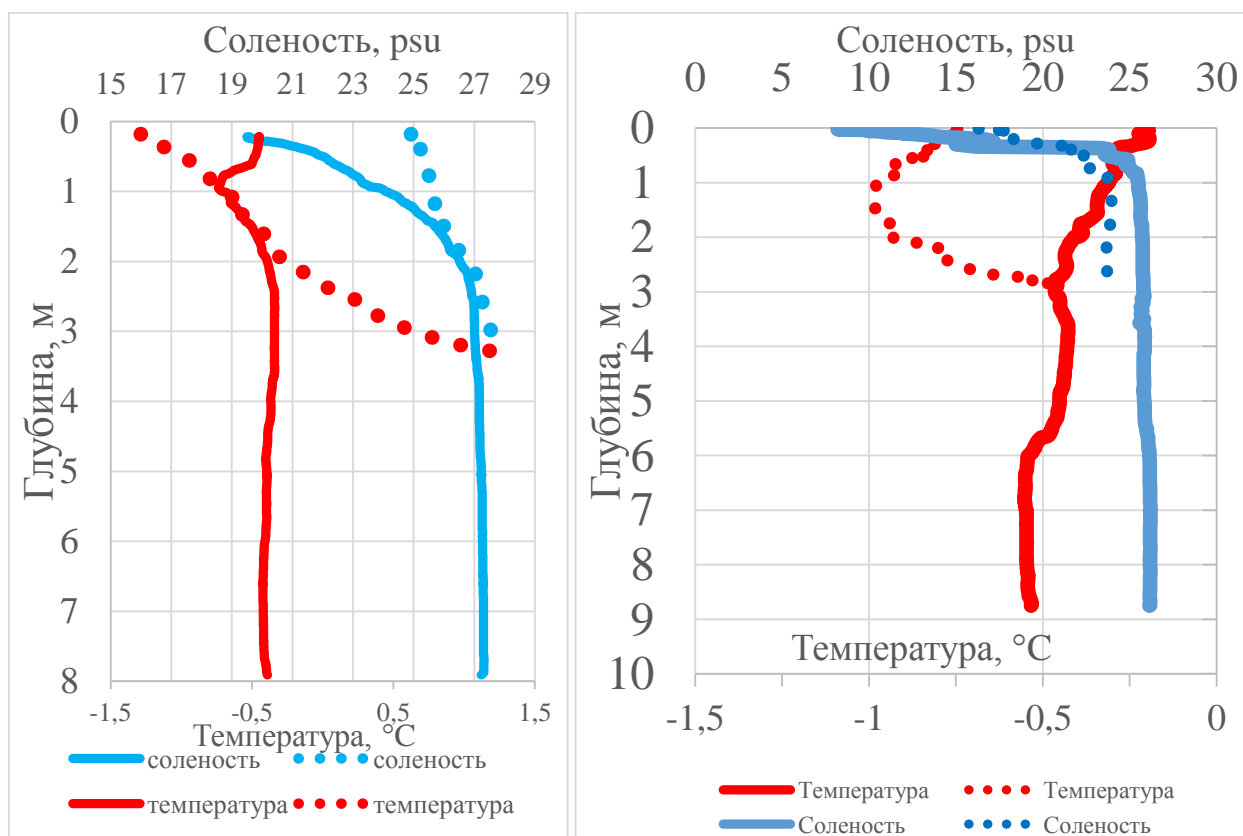


Рис. 4.17 Вертикальные профили температуры [°C] и солености [%] в лагуне Колюшковая и проливе Сухая Салма, март 2021 г. (справа) и 2023 г. (слева).

Из рис. 4.17 видно, что структура вод в два зимних сезона разных годов имеет как сходства, так и отличия друг от друга. Важно отметить, что глубже 2 м наблюдается термоклин, за счет которого в придонном горизонте в марте 2023 г. была обнаружена положительная

температура. Скорее всего, это было связано с более мягкой зимой 2022-2023 гг. В более суровую зиму 2020-2021 гг. воды в проливе Сухая Салма оказались более теплыми, чем в лагуне Колюшковой.

Рассмотрим среднемесячный ход температур в г.Кандалакша (рис. 4.18). Это ближайший пункт к исследуемой акватории с метеостанцией, данные по которому находятся в открытом доступе. Исходя из ряда наблюдений 2017-2023 гг., можно взять 2018, 2019, 2021 и 2022 года, когда наблюдения проводились примерно в одни и те же даты как в лагуне Колюшковой, так и в проливе Сухая Салма.

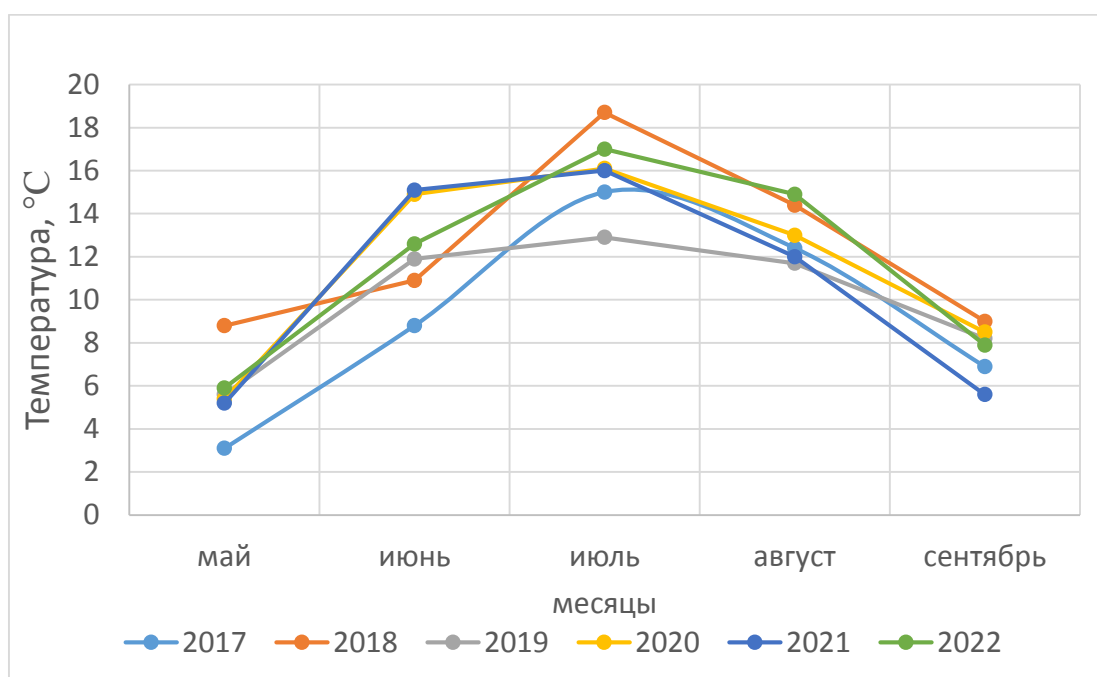


Рис. 4.18 Среднемесячные температуры [°C] с мая по сентябрь, г. Кандалакша, 2017-2022 гг. (ВНИИГМИ-МЦД).

Из рис. 4.18 хорошо видно, что среднемесячная температура в июле 2019 г. оказалась сильно ниже (12,9°C) по сравнению с остальными годами. Таким образом, в июле образовались условия (рис. 3.29), похожие на начало осеннего сезона, который обычно начинается в конце августа – сентябре.

В целом, в июне среднемесячная температура находится в диапазоне от 8,8 до 15,1°C. Самая низкая температура относится к июню 2018 г., а самая высокая отмечалась в июне 2021 г. Возвращаясь к данным главы 3, можно увидеть, что нет сильной зависимости между температурой вод в лагуне Колюшковой и проливе Сухая Салма и среднемесячной температурой в июне. Так, например, в лагуне воды были прогреты до 16 (рис. 3.13) и 20°C (рис. 3.19) на поверхности в 2018 и 2019 годах соответственно, а в проливе Сухая Салма

только до 12°C (рис. 3.12, 3.18). При этом среднемесячная температура составила около 11°C (рис. 4.18).

Во время наблюдений в более теплом июне 2022 г. (исходя из рис. 4.18), воды в лагуне Колюшковой и проливе Сухая Салма были прогреты только до 13 (рис. 3.28) и 11°C (приложение 1) соответственно. Таким образом, в целом, можно сказать, что на прогрев воды влияет большее количество локальных факторов, чем погода в целом по Белому морю и более высокие среднемесячные температуры не подразумевает более быстрый прогрев лагуны и пролива Сухая Салма.

Также, можно сравнить ежесуточные данные полученные с помощью датчиков температуры, размещенных в лагуне Колюшковая и проливе Сухая Салма на глубинах около 1,5 м (рис. 4.19).

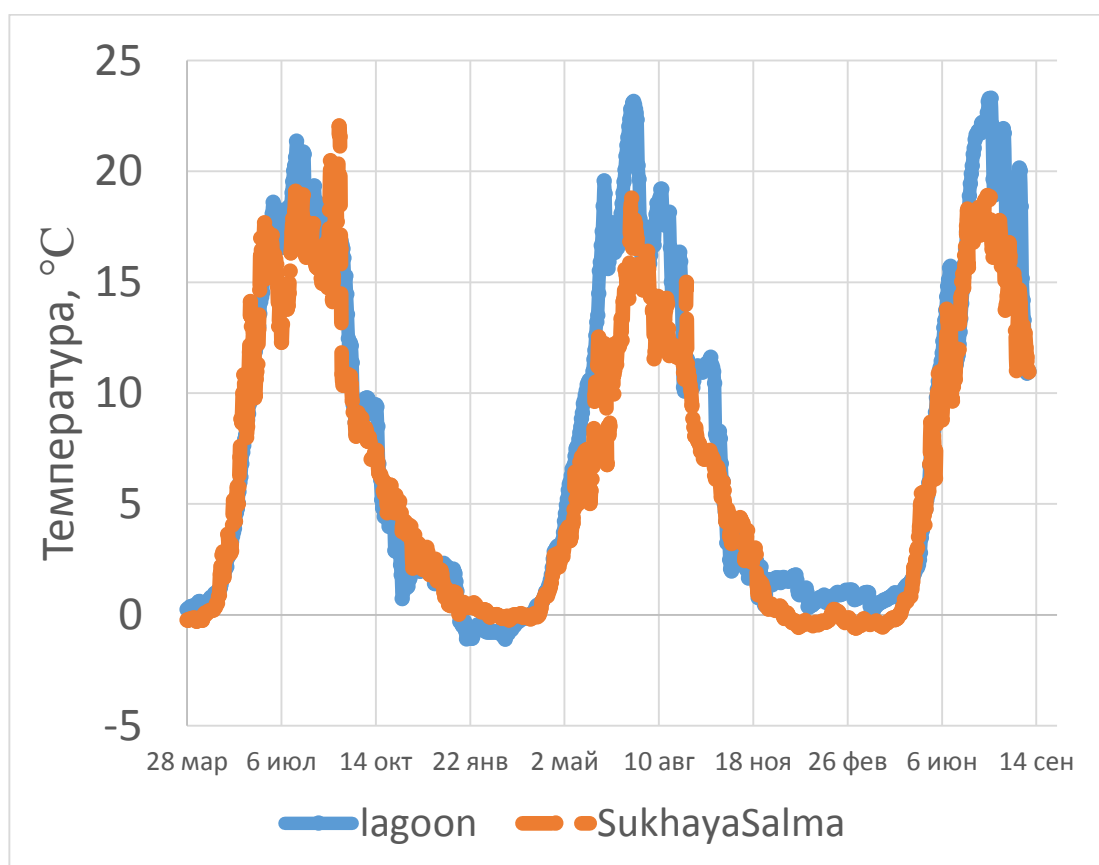


Рис. 4.19 Изменение температуры [°C] в лагуне Колюшковая (син.) и проливе Сухая Салма (оранж.), 28/03/2020 – 06/09/2022 (данные Иванова М.В.)

Из рис. 4.19 видно, что температура имеет достаточно сильные колебания. Хорошо видно, что в теплое время года разница температур между лагуной и проливом Сухая Салма отличается в зависимости от года, однако к июлю лагуна всегда нагревается сильнее, чем

вода в проливе Сухая Салма. Также, можно отметить, что в 2020 и 2022 годах вода в лагуне была положительной (на глубине размещения датчиков), а в 2021 году отрицательной.



## Заключение

Данное исследование построено практически целиком на основе экспериментальных данных. Все измерения были произведены при непосредственном участии автора, причем, важно отметить, что большинство исследований термохалинной структуры вод в рассматриваемых акваториях, а также хлорофилла и кислорода, были сделаны впервые. Поэтому основным результатом данной работы следует назвать создание уникальной базы данных, которая содержит измерения характеристик вод в губе Летней, губе Лебяжьей и лагуне Колюшковой. Следует отметить, что измерения и суточные станции производились в различные сезоны года (зимний и летний), а также приурочены к различным фазам прилива в Белом море (сигизия и квадратура), что позволяет сделать выводы об особенностях океанологических условий в данных акваториях.

В работе были рассмотрены термохалинные структуры вод для теплых и холодных сезонов для трех акваторий: губа Летняя, губа Лебяжья с заливом Амазона, лагуна Колюшковая вместе с проливом Сухая Салма. Сделанные автором измерения являются весьма актуальными и имеют реальное практическое приложение, представляя океанологическое обоснование развития гидробионтов в этих акваториях. Гидробионты в рассматриваемых акваториях являются предметом изучения гидробиологов биологического факультета СПбГУ в рамках биологических практик студентов на Белом море, а также в рамках выполнения грантов РФФИ (№ 18-04-01052, 2018 г., «Трехиглая колюшка *Gasterosteus aculeatus* как связующее звено между сообществами открытого моря и побережья Белого моря») под руководством Иванова М.В. и РНФ (№ 19-14-00092 «Осиная талия экосистем северных морей: долговременная динамика, популяционная структура и трофические связи массовых пелагических рыб Белого и Балтийского морей», 2019 г.; №22-24-00956 «Обычная, но неизвестная рыба: девятииглая колюшка *Pungitius pungitius* L. Белого и Балтийского морей – популяционные характеристики и роль в экосистеме», 2022 г.) под руководством Лайуса Д.Л. и Иванова М.В. соответственно. В настоящей работе дано океанологическое обоснование развития тех или иных видов гидробионтов или, наоборот, их отсутствия. Без понимания океанологических условий в различные сезоны их эволюцию объяснить невозможно.

Таким образом, данная работа является частью большого междисциплинарного исследования ученых различных направлений – океанологов и гидробиологов. В ходе исследования также были получены следующие выводы:

– Установлено, что в губе Летняя благоприятные условия для развития гидробионтов достигаются за счет оптимальных глубин до 18-20 м, где воды не перегреваются, как в кутовой части губы, и не охлаждаются, как это происходит в мористой части вследствие притока холодных вод из открытого моря. Это соответствует развитию наибольшего числа видов в средней части губы, расположенной равноудаленно от мористой и от кутовой части. В то же время максимальные значения биомассы были наоборот в кутовой и мористой части губы.

– Губа Лебяжья мелководна (средняя глубина составляет около 6 м) и ограничена узкой перемычкой, отделяющей ее от пролива Подпахта, поэтому изменение температуры и концентрации солености в губе Лебяжья не так ярко выражено, как в более открытых частях данной части акватории Кандалакшского залива. Однако за счет отсутствия физической перемычки в губу Лебяжья часто проникают холодные и соленые воды вместе с приливом, поэтому в губе Лебяжья можно обнаружить трехиглую колюшку, и здесь ее плотность составляет около 7,7 экз/м<sup>2</sup>, что не является высокими показателями, так как максимальная плотность колюшки в Белом море может достигать значений более 100 экз./м<sup>2</sup>. Эта разница обусловлена в первую очередь отсутствием растительности в губе Лебяжьей, в которой трехиглая колюшка предпочитает нереститься. В губе Лебяжья литораль представляет собой илесто-песчаный пляж, где трудно укрыть свое гнездо от хищников и своих сородичей. Другим фактором, влияющим на невысокие концентрации трехиглой колюшки, являются невысокие скорости течений (до 1 см/с), приводящие к образованию застойных явлений, выпадению илестых осадков и образованию мелководий, что не позволяет развитию нереста колюшек, однако такие скорости подходят для развития других гидробионтов, например, съедобных мидий при наличии подходящего для них субстрата.

– В лагуне Колюшковой создаются наиболее благоприятные условия для развития трехиглой колюшки вследствие изолированности, лучшего прогрева и большей кормовой базы и для зимовки (не каждый год) вследствие не полного охлаждения данного водоема зимой и присутствия положительных температур в придонном горизонте (во время мягкой зимы). Плотность трехиглой колюшки в данной акватории достигает 42,7 экз/м<sup>2</sup> и выше. Из-за ограниченности связи лагуны Колюшковая с морем у нее гораздо менее выражены приливо-отливные колебания. Это приводит к более стабильным термохалинным условиям, образованию обширных хорошо прогреваемых мелководий, более высоким летним температурам и концентрациям солености. В частности, к концу теплого сезона в августе (по данным 2016-2018 гг.) численность молоди колюшки достигала более 50 экз./м<sup>2</sup>

в лагуне Колюшковой. Для сравнения: в Сухой Салме численность молоди колюшки составляла менее 1 экз./м<sup>2</sup>. При этом размеры молоди в августе тоже отличаются: в лагуне Колюшковая молодь более крупная, чем в проливе Сухая Салма. Лагуна Колюшковая является наиболее подходящим среди рассматриваемых акваторий местом для нереста трехиглой колюшки.

– На основе измерений установлены следующие факты:

- в мелководных и изолированных акваториях вода теплее в летний сезон и холоднее в зимний сезон, по сравнению с более глубоководными и менее изолированными;
- ручьи или небольшие реки, впадающие в полуизолированные приливные акватории могут (губа Летняя, залив Амазона), могут по-разному снижать концентрации солености в этих акваториях разным образом: в губе Летняя сток реки распространяется по поверхности, постепенно перемешиваясь с морскими водами, в заливе Амазона воды имеют более низкие концентрации солености по всей своей толще от поверхности до дна;
- приливо-отливные движения, изменяющие уровень моря более чем на 2 м, существенно влияют на распределение температуры и солености в рассмотренных акваториях. Температура может меняться на 5°C, а соленость на 10 в зависимости от фазы прилива.
- летние и зимние сезоны в акваториях, расположенных на небольших расстояниях друг от друга, проявляются по-разному, что обусловлено локальными особенностями этих акваторий.

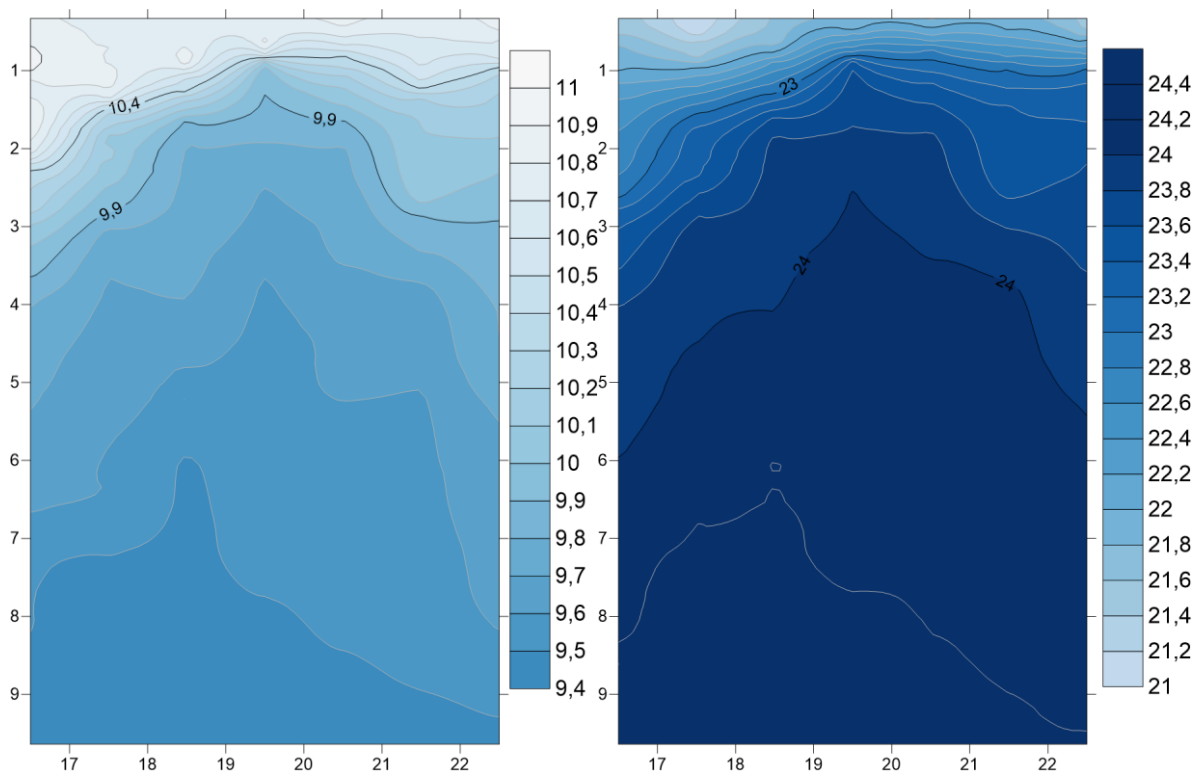
## Список литературы

1. Бабков, А.И. Гидрология Белого моря / А.И. Бабков. – СПб.: Зоологический институт РАН. – 1998. 96 с.
2. Бахвалова А.Е., Иванов М.В., Иванова Т.С., Лайус Д.Л. Роль трехиглой колюшки (*Gasterosteus aculeatus* L.) в питании рыб Белого моря в течение летне-осеннего сезона // Материалы XIII Всероссийской конференции с международным участием. Изучение, рациональное использование и охрана природных ресурсов Белого моря. – СПб. – 2017. С.20-23
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. – Т.2. Белое море. – Вып.1. Гидрометеорологические условия под ред. д-ра техн. Наук Б.Х. Глуховского Л.: Гидрометеиздат. – 1991. 240 с.
4. Демчук А.С., Иванов М.В., Иванова Т.С., Полякова Н.В., Головин П.В., Лайус Д.Л. Питание беломорской трехиглой колюшки *Gasterosteus aculeatus* (Linnaeus, 1758) на нерестилищах // Труды Карельского научного центра РАН. – 2018. - №4. С. 42-58
5. Добровольский, А.Д. Моря СССР / А.Д. Добровольский, Б.С. Залогин. – М.:Изд-во Московского университета, 1982. 146 с.
6. Ионов В.В., Май Р.И., Смагин Р.Е. Численная гидродинамическая модель приливных явлений в губе Кереть (Кандалакшский залив, Белое море) // Известия Русского Географического общества. – 2015. – Т.147. – Вып.2. С.22-37
7. Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Мардашова М.В. Многолетняя динамика гидрологической структуры озера Кисло-Сладкого – полуизолированной лагуны на берегу Белого моря // География: развитие науки и образования. – Т.1. – 2020. С.319-324
8. Краснова Е.Д., Демиденко Н.А., Пантюлин А.Н., Фролова Н.Л., Ефимова Л.Е., Широкова В.А. Термический и ледовый режимы реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей: Труды VIII Международной научно-практической конференции в 2 т. – М.:2014. С.430-443.
9. Краснова Е.Д., Мардашова М.В. Как морской залив превращается в озеро // Природа. - №1. – 2020б. С.16-27
10. Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н. Кисло-сладкие озера, полные чудес // Природа. - №2. – 2013. С. 39-48
11. Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н., Белевич Т.А., Воронов Д.А., Демиденко Н.А., Житина Л.С., Ильяш Л.В., Кокрятская Н.М., Лунина О.Н., Мардашова М.В., Прудковский А.А.,

- Саввичев А.С., Филиппов А.С., Шевченко В.П. Комплексные исследования отделяющихся водоемов на разных стадиях изоляции от Белого моря в марте 2012г. // Океанология. – 2013. – Т.53. - №5. С.714-717
12. Лайус Д. Л., Иванова Т. С., Шатских Е. В., Иванов М. В. «Волны жизни» беломорской колюшки // Природа. - 2013. - Т. 4. С. 43-52
13. Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Краснова Е.Д. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // Океанология. – 2021. – Т.61. – №3. С.401-412
14. Мардашова М.В., Воронов Д.А., Краснова Е.Д. Бентосные сообщества прибрежных водоемов на разных стадиях изоляции от моря в окрестностях беломорской биостанции МГУ (Кандалакшский залив Белого моря). – Зоологический журнал. – 2020. – Т.99. – №7. С.819-837
15. Маховиков, А. Д., Смагин, Р. Е., Иванов, М. В. Особенности гидрологии ппролива Сухая Салма Белого моря // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития. СПб.: Химиздат. – 2019. С.599-603
16. Маховиков А. Д., Смагин Р. Е., Иванов М. В. Особенности летнего гидрологического режима пролива Сухая Салма Белого моря // Беломорская студенческая научная сессия СПбГУ — 2020: Тезисы докладов. Свое издательство ред. Санкт-Петербург. С. 22.
17. Наблюдения за ледовой обстановкой: Учебное пособие. – СПб.:ГУ «АНИИ», 2009. – 360с.
18. Океанология. Биология океана Т.1. – Москва: изд-во «Наука», 1977. – 398 С.
19. Океанология. Биология океана Т.2. – Москва: изд-во «Наука», 1977. – 399 С.
20. Пантюлин А.Н. Гидрологические и экологические исследования Белого моря // Динамика и взаимодействие атмосферы и гидросферы. М.: Городец, 2004. С. 265-281.
21. Пантюлин А. Н., Краснова Е. Д. Отделяющиеся водоемы Белого моря: новый объект для междисциплинарных исследований // Геология морей и океанов. Материалы XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. – Т.III. – М.: 2011. С.241-245
22. Раилкин А.И., Бесядовский А.Р., Примаков И.М., Колдунов А.В. Взаимодействие прибрежных бентосных сообществ Белого моря с придонным слоем / Под ред. д-ра биол. Наук А.И. Раилкина. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. – 408 с. ISBN 978-5-288-05395-5
23. Шапоренко С.И., Корнеева Г.А., Пантюлин А.Н., Перцова Н.М. Особенности экосистем отшнуровывающихся водоемов Кандалакшского залива Белого моря // Водные ресурсы. – 2005. – Т. 32. – № 5. С. 517–532.

24. Ekman M., Mäkinen J. Recent postglacial rebound, gravity change and mantle flow in Fennoscandia // *Geophysical Journal International*. – 1996. – №126. PP.229-234 DOI: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb05281.x
25. Lajus D., Ivanova T., Rybkina E., Lajus J., Ivanov M. Multidecadal fluctuations of threespine stickleback in the White Sea and their correlation with temperature // *ICES Journal of Marine Science*. – 2020. 13 p. doi:10.1093/icesjms/fsaa192
26. Rybkina E.V., Ivanova T.S., Ivanov M.V., Kucheryavyu A.V., Lajus D.L. Habitat preference of three-spined stickleback juveniles in experimental conditions and in wild eelgrass // *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. - №97(7). – 2016. PP.1437-1445 doi:10.1017/S0025315416000825
27. Scherneck H.-G., Johansson J.M., Koivula H., van Dam T., Davis J.L. Vertical crustal motion observed in the BIFROST project // *Journal of Geodynamics*. – №35. – 2003. PP. 425-441 doi:10.1016/S0264-3707(03)00005-X
28. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. URL: <http://meteo.ru>
29. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. URL: <portal.esimo.ru/portal>
30. Яндекс. Карты. URL: <https://yandex.ru/maps>
31. Xylem Analytics – Australia. URL: <https://www.xylem-analytics.com.au>

## Приложение 1



Временная изменчивость температуры [°C] (слева) и солёности [‰] (справа), пролив Сухая Салма, 20.06.2022 16:30 – 22:30.