



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления
прибрежными зонами**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему Математическое моделирование колебаний уровня моря в
мелководном заливе в программном комплексе CARDINAL

Исполнитель Ненашев Даниил Михайлович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«дд» ов 2026г.

Санкт-Петербург

2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Физико-географическая характеристика Кислой губы как уникальной природно-технической системы.....	5
1.1. Географическое положение, морфометрия и климатические условия	5
1.2. Гидрологический режим, водообмен и стратификация вод	7
1.3. Кислая губа как полигон для математического моделирования.	9
Глава 2. Постановка задачи численного моделирования динамики вод Кислой губы Баренцева моря.....	11
2.1 Обоснование выбора программного комплекса CARDINAL.....	11
2.2 Расчётная области и генерация сетки для Кислой губы	12
2.3 Граничные и начальные условия	15
Глава 3. Результаты численных экспериментов моделирования динамики вод Кислой губы Баренцева моря.....	21
3.1 Геоинформационный двойник Кислой губы: концепция и значимость ...	21
3.2 Подготовка к численным экспериментам	22
3.3 Результаты численных экспериментов	26
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
Список использованных источников	49

ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобального перехода к возобновляемым источникам энергии приливная энергетика привлекает внимание как предсказуемый и экологически чистый ресурс. Однако строительство гидротехнических сооружений в прибрежной зоне кардинально трансформирует локальную гидродинамику, термохалинную структуру и режим водообмена. Кислая губа Баренцева моря представляет собой уникальный природно-технический комплекс, где более полувека функционирует первая в России приливная электростанция (ПЭС).[1] Изоляция акватории плотиной, ограничение водообмена с открытым морем, сезонное распреснение поверхностных слоёв и формирование устойчивой плотностной стратификации создают сложную, нестационарную гидродинамическую систему, традиционными полевыми методами изучение которой ресурсозатратно. [2]

В последние десятилетия численное моделирование стало ключевым инструментом для прогнозирования изменений в прибрежных акваториях, оценки влияния антропогенных объектов на экосистемы и оптимизации режимов эксплуатации гидротехнических сооружений. Для Кислой губы до настоящего времени отсутствует полноценная гидродинамическая модель, способная одновременно воспроизводить приливо-отливную динамику уровня, процессы вертикального и горизонтального водообмена, а также формирование термохалинной стратификации в условиях ограниченной связи с морем. Разработка и верификация такой модели не только закрывает пробел в понимании локальной океанологии, но и служит теоретической основой для проектирования других проектов в схожих условиях. [3]

Цель работы: создание математической модели для воспроизведения и анализа динамики вод Кислой губы с учётом влияния Кислогубской ПЭС в программном комплексе CARDINAL.

Задачи исследования:

1. Подготовить краткую физико-географическую характеристику Кислой губы и исторические данные о Кислогубской ПЭС
2. Проанализировать особенности приливного режима, механизмы вертикальной и горизонтальной адвекции, а также устойчивость стратификации водной толщи
3. Сформировать расчетную область численной модели, подготовить граничные и начальные условия с учетом данных натурных наблюдений.
4. Провести численные эксперименты и проанализировать влияние разных факторов (приливы, речной сток, степень изоляции от сопредельной акватории) на формирование течений и колебаний уровня губы.

Глава 1. Физико-географическая характеристика Кислой губы как уникальной природно-технической системы

1.1. Географическое положение, морфометрия и климатические условия

Кислая губа расположена в северо-западной части Кольского полуострова (Мурманская область) и является полуизолированным заливом (губой) Баренцева моря (рис. 1). Координаты акватории: $\sim 69^{\circ}21'$ с.ш., $33^{\circ}04'$ в.д. Губа сообщается с более крупной Ура-губой через узкий мелководный пролив шириной менее 30 м, глубина которого в малую воду не превышает 4 м.[4]

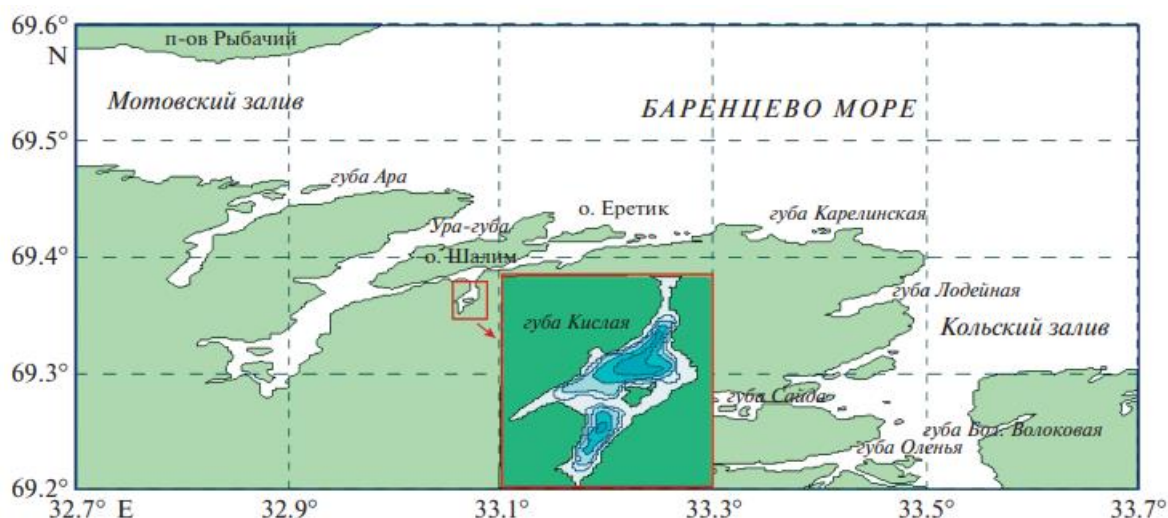


Рисунок 1 Кислая губа на карте Баренцева моря [4]

Морфометрические параметры акватории отличаются компактностью и сложным рельефом дна. Длина губы составляет 3,5 км, максимальная ширина - до 1,5 км, площадь водного зеркала варьирует от 0,97 до 1,5 км² в зависимости от фазы прилива.[5] До сооружения ПЭС водопропускной способности горла не хватало, и по мере повышения уровня в месте

наибольшего сужения образовывался перепад. Наибольшие скорости потока достигали 3-3,5 м/с, и наблюдались за 1,5 часа до пика прилива или отлива. Максимальный расход превышал 300 м³/с. Средняя глубина губы Кислая невелика - 12,5 м, однако в центральной и вершинной частях выделяются две глубоководные впадины (котловины), разделённые подводным порогом глубиной ~2,5 м в районе острова Тюлений.[6] Глубины северной котловины достигают 36 м, южной - до 40 м. Береговая линия преимущественно скалистая, литораль каменисто-валунная, местами илисто-песчаная. Площадь осушной зоны в квадратурные приливы составляет 0,06-0,09 км², в сизигийные - 0,14-0,18 км². [5]

Климат района относится к атлантико-арктической зоне умеренного климата с выраженным влиянием тёплых воздушных масс с Северной Атлантики. Средняя температура наиболее холодных месяцев (январь-февраль) не опускается ниже -11 °С, июльская средняя температура колеблется в пределах 11 °С.[6] Годовое количество осадков достигает 600 мм, снежный покров устойчиво держится 180-200 дней. Особенностью Кислой губы является её способность покрываться зимним льдом, что нетипично для незамерзающих в зимний период акваторий Баренцева моря. Данный феномен обусловлен сильным опреснением поверхностного слоя и ограниченным водообменом. Толщина льда при этом может достигать 100 см, занимая большую часть акватории, при этом возле ПЭС наблюдается постоянная полынья.[5]

Кислогубская приливная электростанция была возведена в 1964-1968 гг. в створе губы по проекту Л. Б. Бернштейна.[7] Объект проектировался как опытно-промышленный полигон для отработки технологий строительства и эксплуатации будущих крупных приливных энергокомплексов. Уникальность инженерного решения заключалась в применении наплавного метода: корпус здания станции (36×18×15 м, водоизмещение 5000 т) был собран в строительном доке на Кольском заливе, оснащён оборудованием и отбуксирован к месту установки, где после баллаستировки погружён на

подготовленное подводное основание. Здание ПЭС одновременно выполняет функцию отсечной плотины, полностью изолируя губу от открытого моря.[8]

Первоначальная мощность станции составляла 400 кВт, в последующие десятилетия проводилась модернизация с установкой ортогональных гидроагрегатов двустороннего действия, что позволило увеличить мощность до 1,7 МВт. Однако главное значение ПЭС для океанологии заключается не в производстве электроэнергии, а в кардинальном изменении гидрологического режима акватории.[9]

Строительство станции привело к резкому сокращению водообмена с морем. В период возведения фильтрующей дамбы (1964-1968) водообмен упал до менее 6% от естественного, что вызвало опреснение поверхностных слоёв, зимнее замерзание акватории, гибель литоральной биоты и формирование сероводородной зоны в котловинах глубже 15-20 м.[10] После пуска станции и последующих изменений режимов эксплуатации (переход к односменному, затем к трёхсменному режиму с 1983 г.) водообмен восстановился до 25-30%, а в периоды холостых пропусков через водосливы достигал 50%.[11] Несмотря на частичное восстановление экосистемы, гидрологический режим остался трансформированным: амплитуда приливов снизилась с ~4 м в пике до 3 м, а акватория приобрела признаки меромиктического водоёма с устойчивой стратификацией.[12]

1.2. Гидрологический режим, водообмен и стратификация вод

Гидрология Кислой губы определяется сложным взаимодействием приливных сил, ограниченного водообмена через водопропускные сооружения ПЭС, материкового и ручьевого стока, а также сезонного теплообмена с атмосферой.

Приливный режим и водообмен. Естественный полусуточный прилив в губе имеет высоту 1,1-3,9 м.[13] Вблизи водопропускного отверстия формируется мощная адвективная струя со скоростями до 3 м/с, которая

прижимается к западному берегу и быстро теряет энергию. Уже на расстоянии 200-300 м от оси струи скорости падают до 10-15 см/с, а в удалённых лагунах в безветренную погоду вертикальное перемешивание практически отсутствует. Это создаёт условия для формирования застойных зон и тонкого приповерхностного слоя распреснённых вод («мутная диффузия»), распространяющегося на расстояние до 1,5 км от ручьёв.[5]

В летний период акватория характеризуется устойчивой плотностной стратификацией. Наблюдения показывают чёткое разделение водной толщи на три основные массы:

1. Северо-восточная приповерхностная - формируется за счёт водообмена через ПЭС, характеризуется повышенной солёностью (до 31,8‰ у поверхности) и морским происхождением.[5]

2. Юго-западная приповерхностная - испытывает сильное влияние ручьевого стока, солёность на поверхности может опускаться до 6-10 ‰, температура летом достигает 12-13 °C.[5]

3. Придонная водная масса - холодная (1-2 °C), высокосолёная (34-34,5 ‰), хорошо перемешанная в период осенне-зимней конвекции, изолирована от поверхности пикноклином.[5]

Пикноклин в северной котловине залегает на глубинах 15-25 м, в южной на 2-20 м, причём его нижняя граница наклонена к дну, ограничивая наиболее солёные и холодные воды.[5] Расчёты частоты Вайсяля-Брента подтверждают устойчивую стратификацию, которая подавляет вертикальный обмен между поверхностным и придонным слоями.[14] В придонных горизонтах наблюдается дефицит растворённого кислорода (вплоть до 0 мл/л в отдельные периоды), накопление биогенных элементов и формирование восстановительных условий.[15]

Анализ данных показывает, что сезонная составляющая определяет 90-98 % вертикальной изменчивости гидрохимических характеристик. Однако оставшиеся 2-10 % изменчивости, обусловленные различиями в горизонтальной адвекции и химико-биологических процессах, ответственны

за формирование различий между северной и южной котловинами. В частности, меридиональная и зональная адвекция в зоне действия приливной струи имеет единый механизм генерации, тогда как в удалённых от струи районах горизонтальный перенос существенно ослаблен и носит диффузионный характер. [16]

1.3. Кислая губа как полигон для математического моделирования.

Уникальность Кислой губы для современных гидрофизических исследований заключается в сочетании компактных размеров, чётко определённых границ, длительного ряда натурных наблюдений и выраженного антропогенного воздействия. Акватория представляет собой идеальный «природный резервуар» для верификации трёхмерных гидродинамических моделей по следующим причинам:

Контролируемые граничные условия. Узкий пролив и наличие гидротехнического сооружения позволяют точно задать параметры водообмена.

Ярко выраженная стратификация. Устойчивый пикноклин, чёткое разделение водных масс и наличие застойных зон делают объект идеальным для тестирования параметризации вертикального перемешивания и турбулентной диффузии в условиях ограниченного водообмена.

Доступность данных. Многолетний мониторинг РГГМУ и ПИНРО предоставляют детальные профили температуры, солёности, кислорода, биогенов, что позволяет проводить многоуровневую калибровку.[5]

Прикладная значимость. Результаты моделирования могут быть напрямую использованы для оптимизации режимов эксплуатации ПЭС, прогнозирования последствий изменения климата, а также для оценки экологических рисков при проектировании новых приливных энергообъектов в арктической зоне.[9]

Таким образом, Кислая губа выступает не просто как локальная акватория с изменённым режимом, а как комплексная гидродинамическая лаборатория, где взаимодействия прилива, стратификации, адвекции и антропогенного регулирования могут быть воспроизведены и проанализированы с помощью современных численных методов. Именно эти особенности обосновывают необходимость разработки специализированной модели, способной детально описать пространственно-временную эволюцию термохалинных полей и уровня воды в условиях трансформированного прибрежного бассейна.[5,9,16]

Глава 2. Постановка задачи численного моделирования динамики вод Кислой губы Баренцева моря

2.1 Обоснование выбора программного комплекса CARDINAL

Для численного моделирования приливо-отливной динамики, речного стока, ветрового воздействия и термохалинного перемешивания в Кислой губе был выбран программный комплекс CARDINAL (Coastal Area Dynamic Investigation Algorithm).[17] Выбор обусловлен следующими факторами:

CARDINAL решает систему уравнений мелкой воды в гидростатическом приближении, что обеспечивает адекватное воспроизведение приливных колебаний уровня и бароклинных течений в акваториях со сложной батиметрией. Комплекс поддерживает различные типы открытых границ: уровень (L), расход (D), водослив (W), что позволяет корректно описать приливо-отливные процессы через створ ПЭС и поступление пресной воды от ручья. Моделирование термохалинной стратификации. Реализованы уравнения переноса температуры и солёности с учётом бароклинной силы, что критически важно для воспроизведения летней стратификации Кислой губы. Использование криволинейных гранично-зависимых координат и σ -преобразования по вертикали позволяет детально учесть узкий пролив, подводные пороги и прочее. Комплекс успешно использовался для моделирования процессов в Баренцевом, Белом и Балтийском морях, включая задачи прогноза уровня и распространения примесей.[17]

Таким образом, комплекс CARDINAL обеспечивает необходимый теоретический и вычислительный базис для совместного воспроизведения приливной динамики уровня, бароклинных течений, термохалинной стратификации и регулируемого водообмена в условиях трансформированной акватории Кислой губы.

Математическая основа моделирования приливной динамики и термохалинных процессов. В CARDINAL расчёт уровня и течений выполняется на основе системы уравнений мелкой воды в гидростатическом приближении, записанной в криволинейных координатах.[20]

Основные уравнения – движения, неразрывности, переноса температуры и солёности.[17]

Для решения системы уравнений применяется полунеявная конечно-разностная схема на разнесённой C-сетке Аракавы–Мезингера. Такая схема обеспечивает консервативность по массе и импульсу; безусловную устойчивость по гравитационной моде, минимизацию численной диссипации при расчёте адвекции.[17]

Для уравнений переноса T и S используется гибридная схема направленных разностей 3+1 порядков точности, автоматически обеспечивающая монотонность решения.[17]

Параметризация турбулентности и вертикального перемешивания. Для замыкания системы уравнений выбрана модель Прандтля–Монтгомери. Модель учитывает подавление турбулентности при устойчивой стратификации через параметр плавучести, что критически важно для воспроизведения летнего пикноклина Кислой губы. Коэффициент горизонтального обмена рассчитывается по формуле Смагоринского. Придонное трение задано по квадратичному закону, а коэффициент придонного трения рассчитывается по формуле Маннинга.[17]

2.2 Расчётная области и генерация сетки для Кислой губы

Первым этапом численного моделирования является подготовка геометрической основы расчётной области. Для Кислой губы в качестве исходных данных использовались батиметрические данные многолучевого промера и оцифрованные изобаты из отчётов экспедиций РГГМУ.

На основе подготовленных данных в ПК CARDINAL была сгенерирована криволинейная ортогональная сетка, адаптированная к конфигурации акватории (рис. 2)

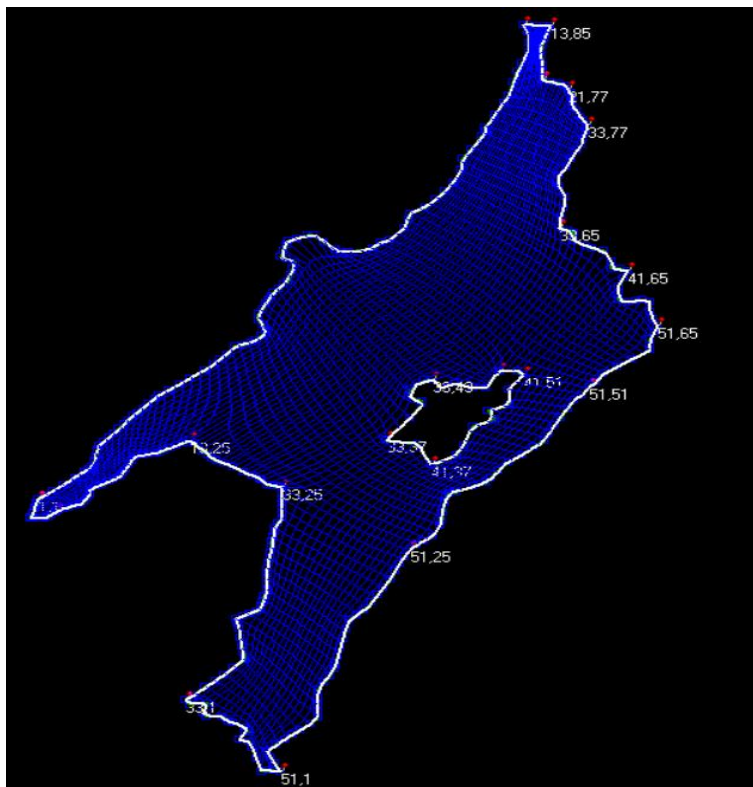


Рисунок 2 – Криволинейная сетка Кислой губы

Для численного моделирования процессов в Кислой губе в программном комплексе CARDINAL изначально была сформирована двухмерная криволинейная гранично-зависимая расчётная сетка размером 51×85 узлов (~4500 расчётных точек). Сетка построена методом, обеспечивающим ортогональность координатных линий и плавное изменение шага. Пространственный шаг неравномерен, но в среднем составляет около 41 м. Остров Тюлений учтён как внутренняя твёрдая граница: узлы сетки, соответствующие его территории, исключены из расчёта, а координатные линии обтекают его контур, что позволяет корректно описать влияние острова на циркуляцию и распределение характеристик. Контроль качества:

отсутствуют пересекающиеся ячейки; переход от мелководных участков к глубоководным котловинам осуществляется плавно.

Так же, на основании карты глубин (рис. 3), а также с учетом специфики береговой линии – губа имеет резкое отвесное западное побережье и более пологое восточное, были заданы изобаты для расчетной области (рис.4).

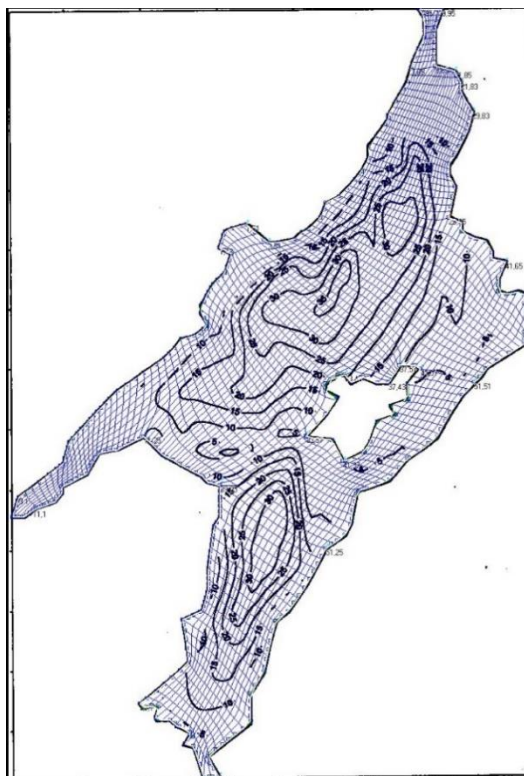


Рисунок 3. Криволинейная сетка, нанесённая на карту глубин

Таким образом, площадь расчетной области составила 1.507 км², средняя глубина 17.3 м, максимальная глубина 40 м, северная котловина 36 м, южная котловина 40 м. Средняя глубина расчетной области оказалась несколько завышенной что может быть связано с недостаточной информацией на исходной карте глубин для западных и южных кутовых частей губы.

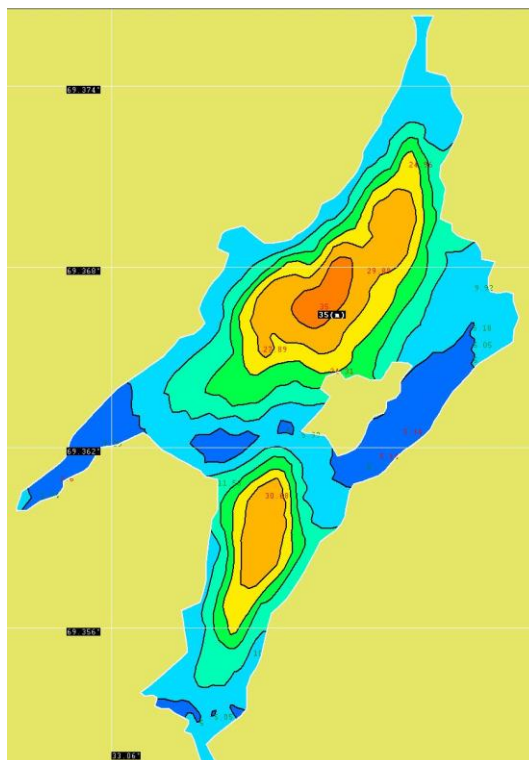


Рисунок 4 Глубины расчетной области

2.3 Граничные и начальные условия

Для воссоздания атмосферных условий были использованы данные, полученные с сайта [gr5](#), с метеостанции находящейся близ устья Ура-Губы, расстояние до губы Кислая около 15 км (ближайшая метеостанция к губе Кислая). Внутри модели условная метеостанция была расположена на северо-восточном берегу Кислой губы.

Для расчетов проведения моделирования был выбран июль, т.к. именно за этот месяц имеются данные обширных натурных наблюдений полученные в 1995-2005 года РГГМУ совместно с ПИНРО.[5] К сожалению, метеоданных за эти года найти не удалось, поэтому было решено определить наиболее типичные температурные и ветровые условия для этого места на основе тех данных, которые есть в базе сайта [gr5](#). [18] Выполнен анализ данных с 2010 по 2025 год (кроме 2013, 2015, 2016 годов, т.к. данные за эти года либо ограничены, либо отсутствуют вовсе). Установлена средняя

температура воздуха за июль каждого года (рис. 5), а также проанализированы розы ветров для каждого года по-отдельности. На рисунке 6 приведена объединенная за все годы роза ветров, а также получена средняя многолетняя температура июля ($13,52^{\circ}\text{C}$) с целью выявления наиболее типичных температурных и ветровых условий.

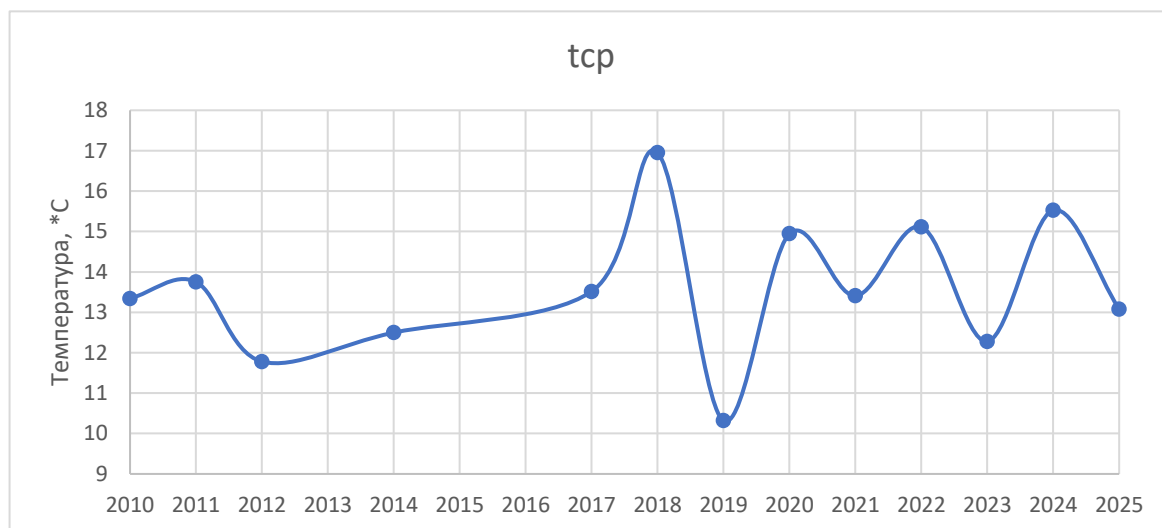


Рисунок 5 График средних температур воздуха с 2010-2025год.
Пост Ура-губа

По результатам анализа, наиболее близкие к среднемноголетним метеорологическим условиям июля наблюдались в 2017 году, т.к. средняя температура июля 2017 года практически совпадает со средней температурой за все года наблюдений, и, аналогично с розой ветров – роза 2017 года наиболее приближена к графику повторяемости ветров за все года наблюдений (рис. 7).

Отдельно можно отметить 2018 и 2019 года как аномальные, в 2018 году средняя температура июля была практически на $2,5^{\circ}\text{C}$ выше чем в среднем, а 2019 год наоборот, отличался как год с самым холодным июлем за 13 лет наблюдений, при средней температуре на 2.2°C ниже среднего значения.

Дополнительно были проанализированы направления по скорости ветра. Была рассчитана средняя скорость для каждого из румбов. (рис. 8).



Рисунок 6 Роза ветров за 2010-2025 года. Пост Ура-губа

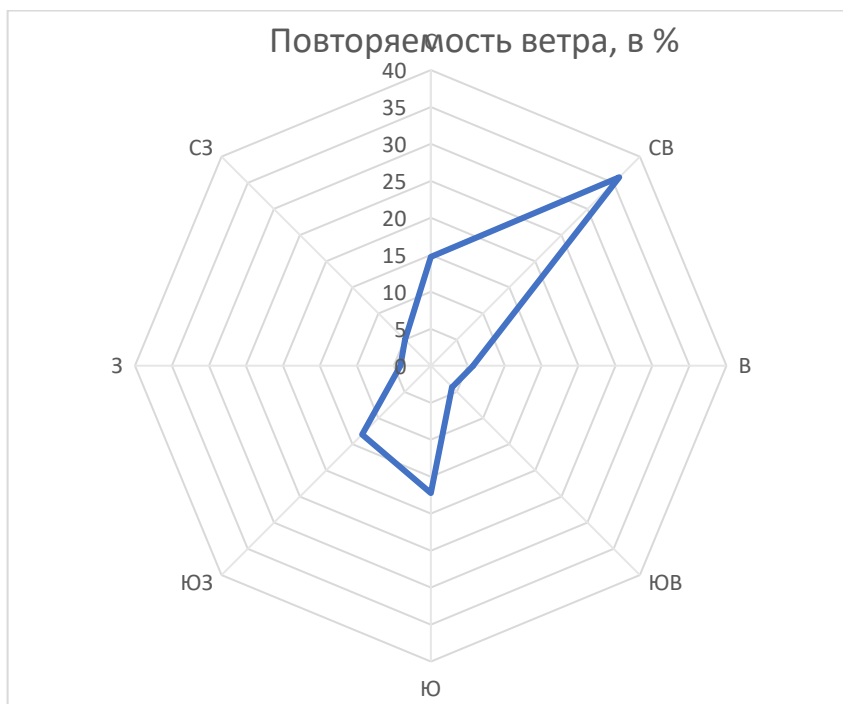


Рисунок 7 Роза ветров за 2017 год. Пост Ура-губа

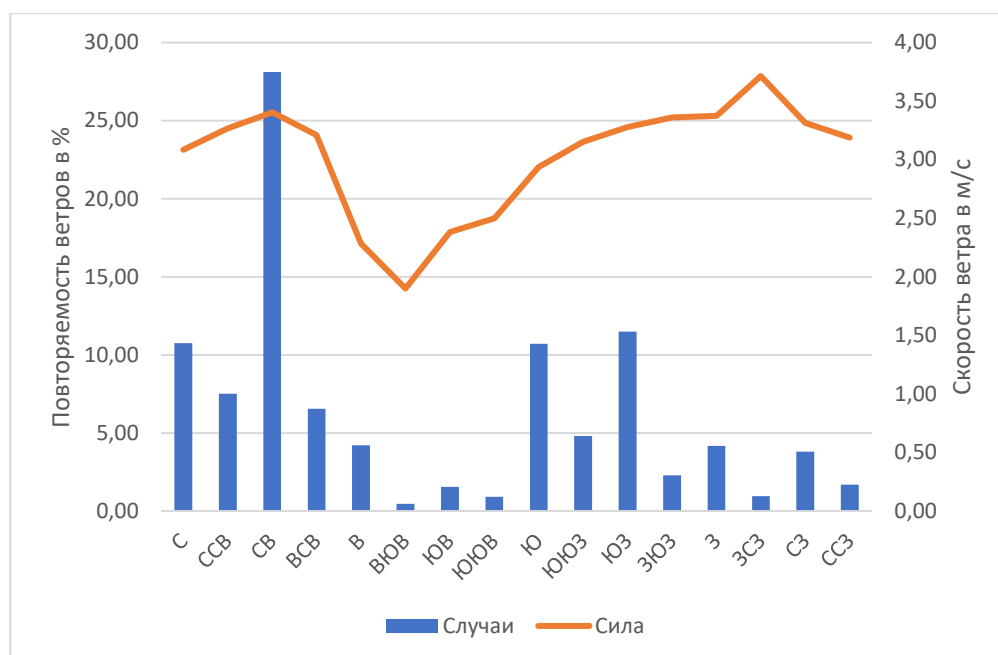


Рисунок 8 Повторяемость ветров (гистограмма) и скорость ветра (линия) 2010-2025 год. Пост. Ура-губа

Для установки корректных значений температуры и солёности в губе Кислая были проанализированы данные многолетних наблюдений РГГМУ совместно с ПИНРО, выполненные в 1995-2005 года. Как наиболее объёмный и репрезентативный по количеству данных был выбран 2000 год.

Ниже представлены (рис. 9) солёности (а) и температуры (б), наглядно демонстрирующие наличие нескольких водных масс в акватории губы Кислая.

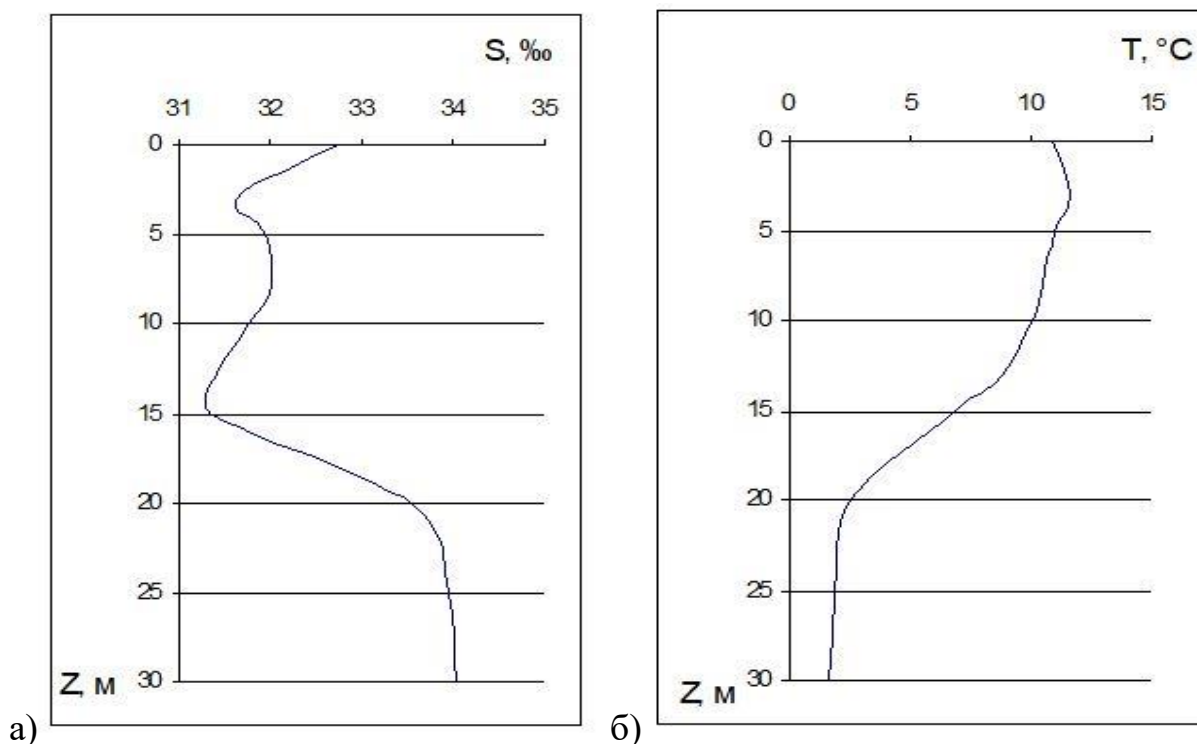


Рисунок 9 Профили солёности и температуры воды за 2000 год,
северная котловина

Исходя из графика, солёность неоднородна по толще воды, и колеблется от 32.7‰ на поверхности до 34.2 ‰ и выше на глубинах. На глубине 15 метров по графику наблюдается ярко выраженный пикноклин. При анализе массивов данных было отмечено более значительное колебание солёности, так на поверхности нередко фиксировалась солёность близкая к 29 ‰ что может быть связано с осадками или стоком ручьев.

По вертикальному профилю температуры воды (Рисунок 9) можно увидеть, что температура находится в диапазоне от 11-13°C у поверхности, опускается до ~7°C на глубине 15 метров. На больших глубинах (20м и более) температура воды не превышает 2-3°C.

Таким образом, чтобы отразить вертикальную структуру Кислой губы при моделировании решено было использовать расчет по 4 слоям (рис. 10). Отсчет слоев шел от поверхности. Слой 1 – поверхностный, слой 4 – придонный.

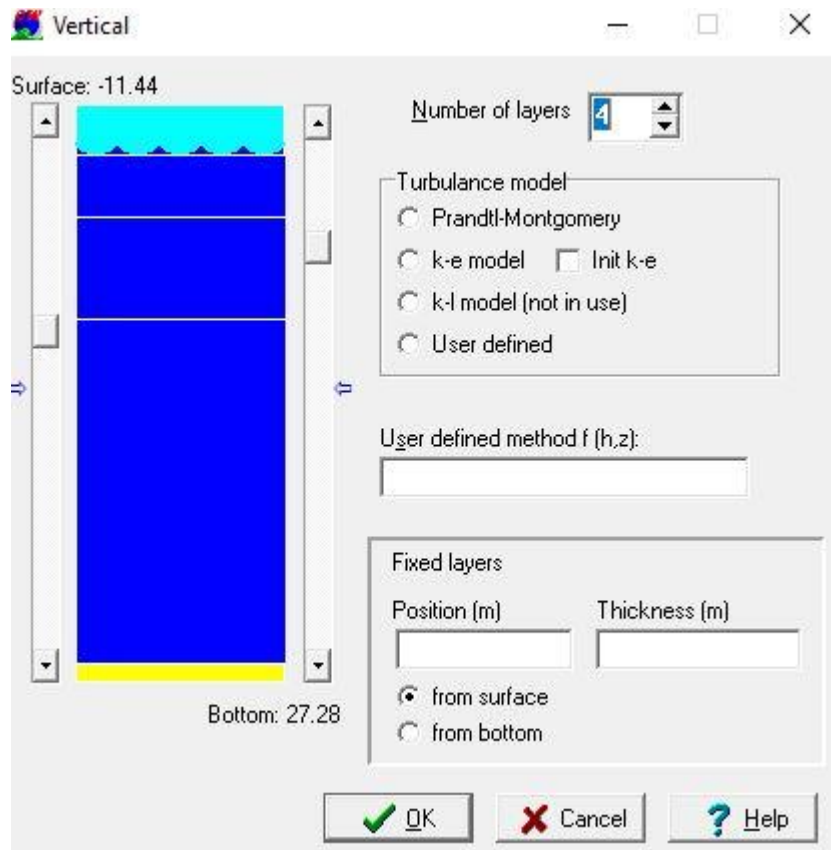


Рисунок 10 Количество заданных слоев в ПК CARDINAL

Для параметризации вертикальных профилей температуры воды и солености в модели Кислой губы использовались зависимости (1) и (2) соответственно:

$$Tw(z)=11*\exp(-0.1*z), \quad (1).$$

$$S(z)=31*\exp(0.0035*z). \quad (2)$$

Глава 3. Результаты численных экспериментов моделирования динамики вод Кислой губы Баренцева моря

3.1 Геоинформационный двойник Кислой губы: концепция и значимость

Создание геоинформационного двойника (ГИД) Кислой губы представляет собой актуальную научно-практическую задачу, решение которой открывает новые возможности для комплексного изучения уникального природно-технологического объекта. Под геоинформационным двойником понимается цифровая динамическая модель акватории, интегрирующая пространственные данные, результаты натурных наблюдений, параметры гидродинамических процессов и характеристики антропогенного воздействия в единую вычислительную среду.

Научная значимость создания ГИД Кислой губы определяется следующими аспектами:

1) интеграция разнородных данных. ГИД позволяет объединить батиметрические данные, гидрологические и гидрохимические измерения, метеорологические наблюдения и параметры эксплуатации ПЭС в согласованной системе координат и временных меток, что обеспечивает возможность комплексного анализа причинно-следственных связей в системе;

2) воспроизведение нестационарных процессов. В отличие от статических карт и схем, ГИД способен воспроизводить эволюцию гидрофизических полей во времени, что критически важно для изучения приливо-отливной динамики, формирования стратификации и механизмов водообмена в условиях ограниченной связи с открытым морем;

3) сценарное моделирование. Наличие верифицированного ГИД позволяет проводить численные эксперименты с различными режимами эксплуатации ПЭС, климатическими сценариями и параметрами внешнего

воздействия, что невозможно реализовать в натурных условиях без риска нарушения экологического баланса акватории.

Однако в еще большей степени создание ГИД интересен как полигон для изучения изолированных водоемов. Подобный опыт может быть использован при различных океанологических, экологических и инженерных задачах.

Таким образом, геоинформационный двойник Кислой губы выступает не только как инструмент исследования конкретного объекта, но и как методический прототип для цифровизации прибрежных акваторий арктического шельфа.

3.2 Подготовка к численным экспериментам

Изначально было запланировано провести моделирование хода уровня при различных условиях в горле Кислой губы: при отсутствии ПЭС, при частично открытой ПЭС, полностью открытой, и полностью закрытой ПЭС (данный вариант предполагал полное отсутствие водообмена с Ура-Губой) однако на первых же этапах моделирования возникла сложность с расчетами: из-за того что водоем имеет очень небольшую площадь, некоторые ячейки на построенной сетке так же имеют крошечную площадь, и как следствие для них необходим очень тщательный расчет, в частности – первичная сетка (рис 11, а) предполагала скорость вычисления – 0.6 секунд за 1 шаг вычисления, (критерий Куранта-Фридрихса-Леви) что приводило к тому, что моделирование одних суток занимало около часа реального времени, без учета времени, необходимого для снятия полученных данных. В связи с этим было решено изменить сетку и ячейки в самых «узких» местах, немного изменив габариты, перетянуть ключевые узлы чтобы ключевые ячейки стали немного шире. Новая сетка (рис 11, б) позволила ускорить расчетное время с 0.6с до 1.5с за шаг (в 2.5 раза) однако наложило и дополнительные ограничения: возможность настройки свободной границы сильно снизилась, тем не менее

скорость расчетов играла решающую роль. Как следствие было решено отказаться от расчетов при отсутствующей ПЭС (а из-за нехватки времени – и от расчетов при закрытой ПЭС).

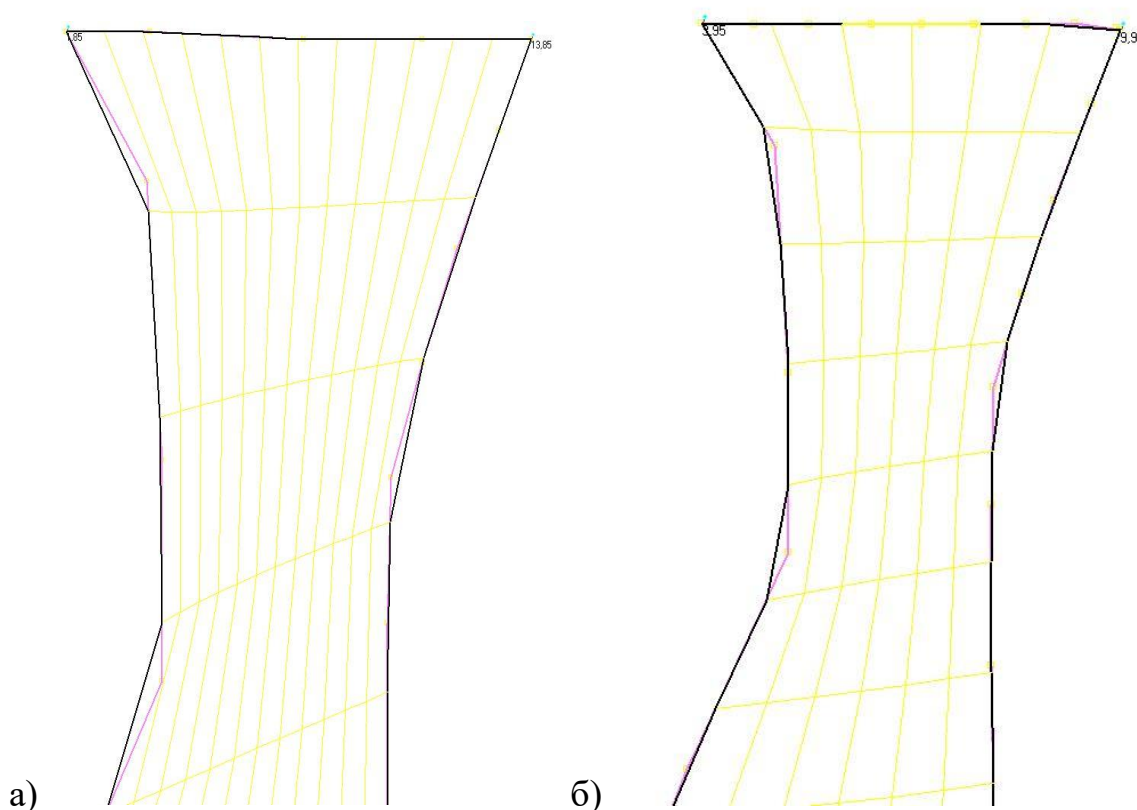


Рисунок 11 Расчетная сетка до (а) и после (б) изменений

Данные по пред рассчитанным приливам были взяты из WXTide32[19] за июль 2017 года. Высота уровня на пике прилива в среднем достигает 2,90м, а самая низкая средняя точка – 1,00м. Длительность приливо-отливных ритмы продолжается 12 часов 25 минут. Начальной границей задан уровень 1.50м, который в течении 12 часов постепенно поднимался до пред рассчитанного значения на 01.07.2017. Это необходимо для того, чтобы все расчетные механизмы пришли в норму, и система была сбалансирована. При первичных расчетах был рассмотрен вариант без начального уровня (уровень принимался как 0) и постепенное повышение уровня в течении двух суток,

однако такая длительная балансировка не давала повышения качества моделирования, поэтому от нее было решено отказаться.

Далее, был определен характер экспериментов, которые будут производиться. Решено произвести моделирование со следующими условиями: широкая открытая граница, широкая открытая граница и атмосферные явления, узкая открытая граница и атмосферные явления, и вариант с узкой открытой границей, атмосферными явлениями и термохалинной компонентой.

На расчетной сетке (рис. 12) было установлено 4 уровнемера по следующим координатам: (6,92) – Горло кислой губы, (28,30) – центр кислой губы, близ порогов около острова Тюлений, (6,2) – западное мелководное ущелье, (42, 12) – юго-восточное ущелье, близ реки вытекающей из озера Пресное.

Так же, был задан разрез, проходящий практически от горла губы, до юго-западной части, длинна разреза 1.6 км.

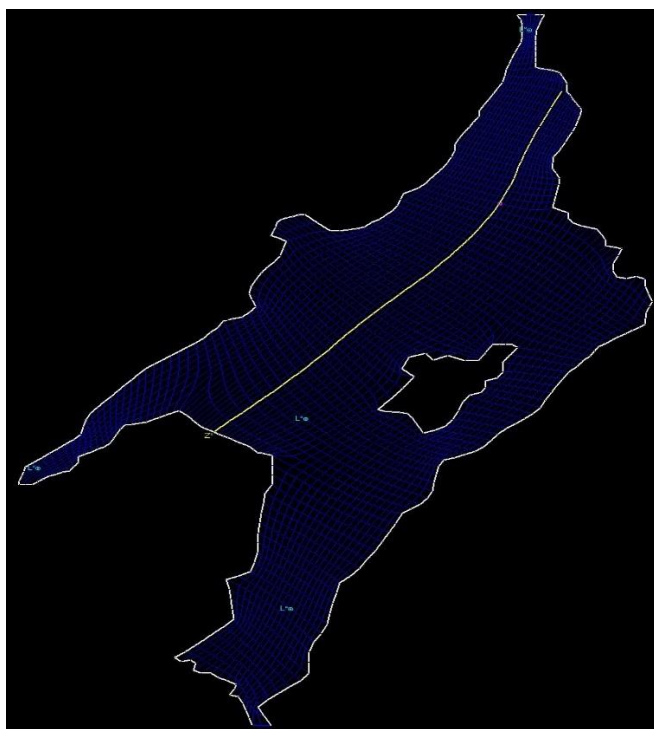


Рисунок 12 Изображение уровнемеров и разреза

По графику (рис. 13) видно, что приливы и отливы несколько раньше фиксируются в горле губы, где из-за узкого пространства вода поступает волнообразно, однако выходя в широкую часть фьорда практически мгновенно растекается, изменяя уровень во всей акватории, аналогичные процессы происходят во время отлива. И это логично, и объясняется малым размером акватории – приливная волна проходит самый длинный участок, с севера на юг (3.5 км) за 8,5 минут. В следствии разница уровня при временном шаге в 125 шагов (около 3 минут) на трех других уровнемерах не превышает 2 см, но при этом между уровнемером в горле губы, и остальными тремя разница может достигать 20 см на пике приливов и отливов.

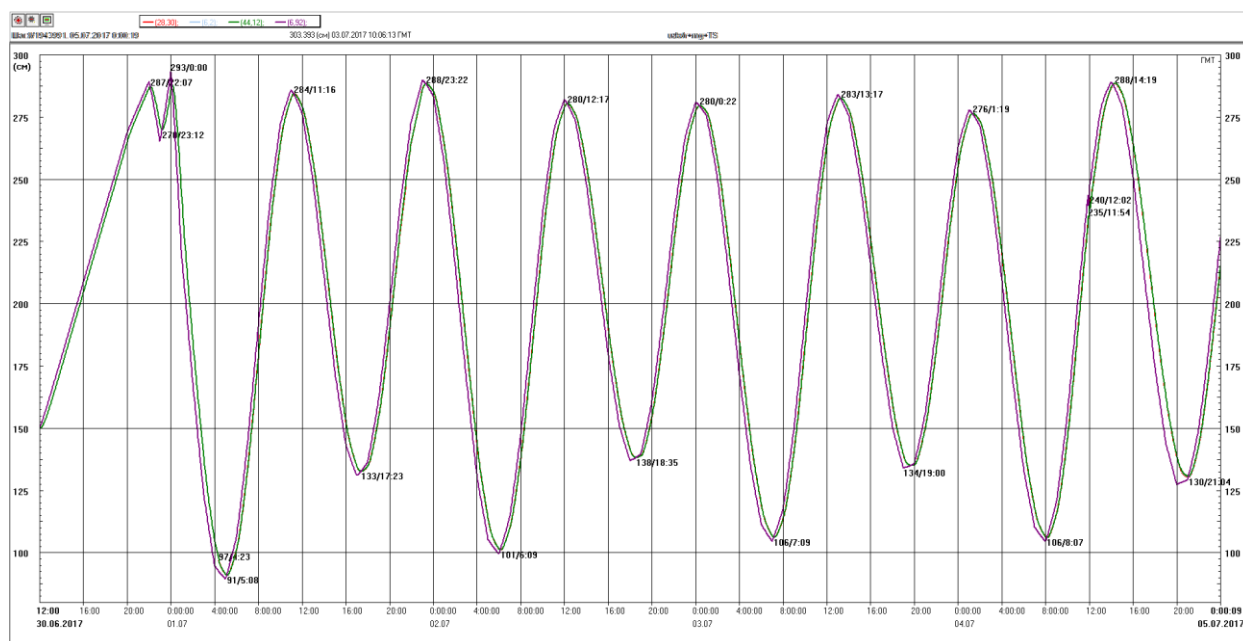


Рисунок 13 Воспроизведенный уровень моря в губе Кислая: горла (фиолетовый) и возле близ ручья на юго-востоке (зеленый)

Для дальнейшего анализа гидродинамических процессов, связанных с приливо-отливной динамикой, было решено взять 4 этапа – 14:00 полная вода, 18:00 – пик отлива, 21:00 – малая вода, 00:00 – пик прилива.

3.3 Результаты численных экспериментов

Первый эксперимент с открытой границей, без атмосферных явлений. При анализе хода течений: в период полной воды (рис. 14а) наибольшая скорость течения фиксируется возле дамбы (до 15 см/с) в поверхностном слое, течение южного направления с постепенным снижением скорости по мере отдаления от дамбы, и расширения акватории. Отдельно можно отметить участок близ о. Тюлений, где находятся мелководные пороги, течение в этом месте незначительно ускоряется. По периферии акватории находятся участки «застойных» вод, течение там отсутствует.

В фазу отлива направление течения меняется, практически на 180 градусов как на поверхности (рис. 14б), так и по всей толще воды. Значения скорости течений возрастают до 75 см/с возле дамбы, и постепенно снижается по мере удаления от нее, вплоть до значений близких к нулю в центральной части акватории. Застойные зоны остаются на своих местах.

На этапе малой воды в целом, направления начинают меняться, но скорости течений имеют совсем низкие значения по всей толще, измеряемые в мм/с что соответствует фазе стояния воды. Схема течений поверхностного слоя представлена на рис. 15а.

На этапе прилива течения устремляются вглубь Кислой губы, скорости течений на поверхности возрастают до 75 см/с, и постепенно снижаются по мере продвижения в глубь водоема (рис. 15б). Сохраняются повышенные скорости на порогах близ о. Тюлений и застойные зоны.

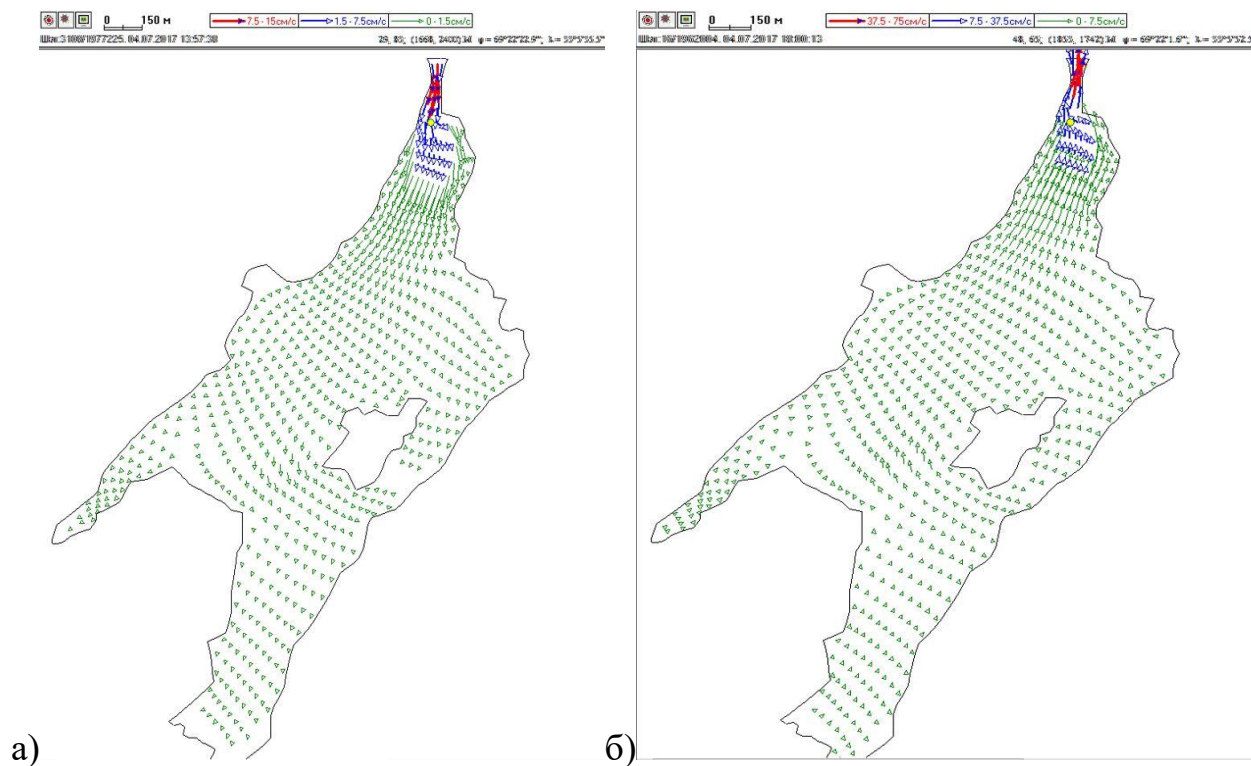


Рисунок 14 Направления и скорости течений при полной воде (а) и отливе (б). Без учета ветра. Поверхностный слой

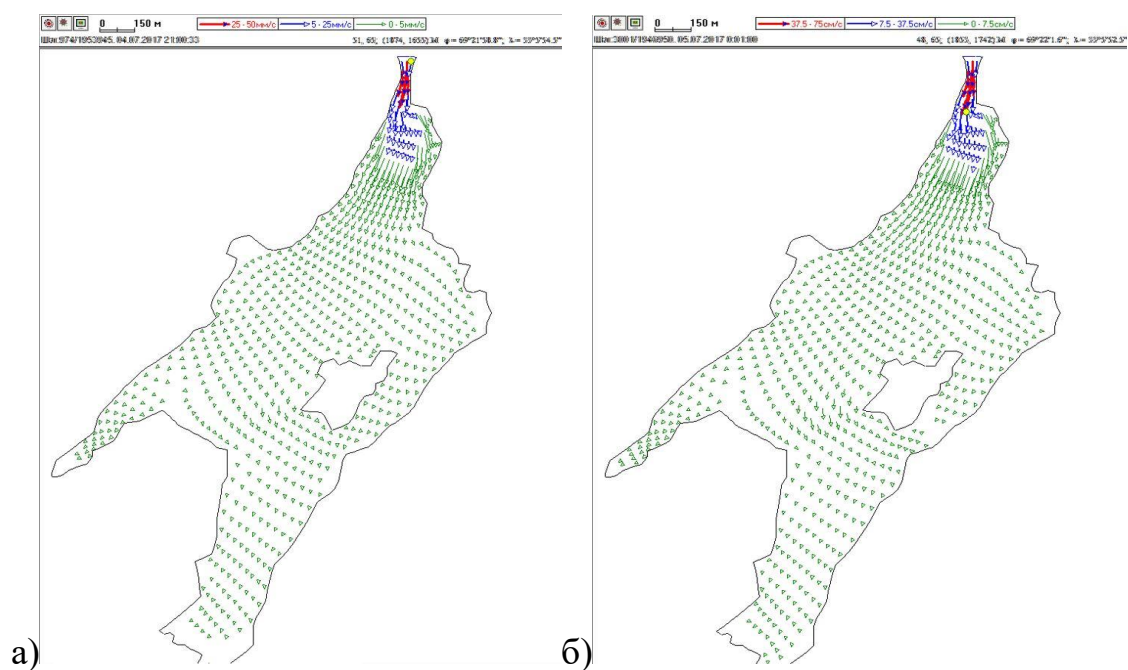


Рисунок 15 Направления и скорости течений при малой воде (а) и приливе (б). Без учета ветра, поверхностный слой

В начале разреза (рис. 16а), где дамба располагается справа, но севернее крайней точки разреза (рис. 12), видно небольшую область (зеленую) со скоростью течения ниже, чем на незначительном удалении, это связано с тем, что струя, проходящая через дамбу, не заворачивает, а движется преимущественно прямо, постепенно распространяясь в стороны, по мере расширения губы. В целом, данные полученные с разреза демонстрируют тенденцию аналогичную карте течений: течения синхронны для всех слоев, разница наблюдается только в скорости, в верхних слоях вода движется быстрее, и скорость течений падает по мере удаления от дамбы. Аналогичная ситуация наблюдается и в фазу отлива (рис. 16б).

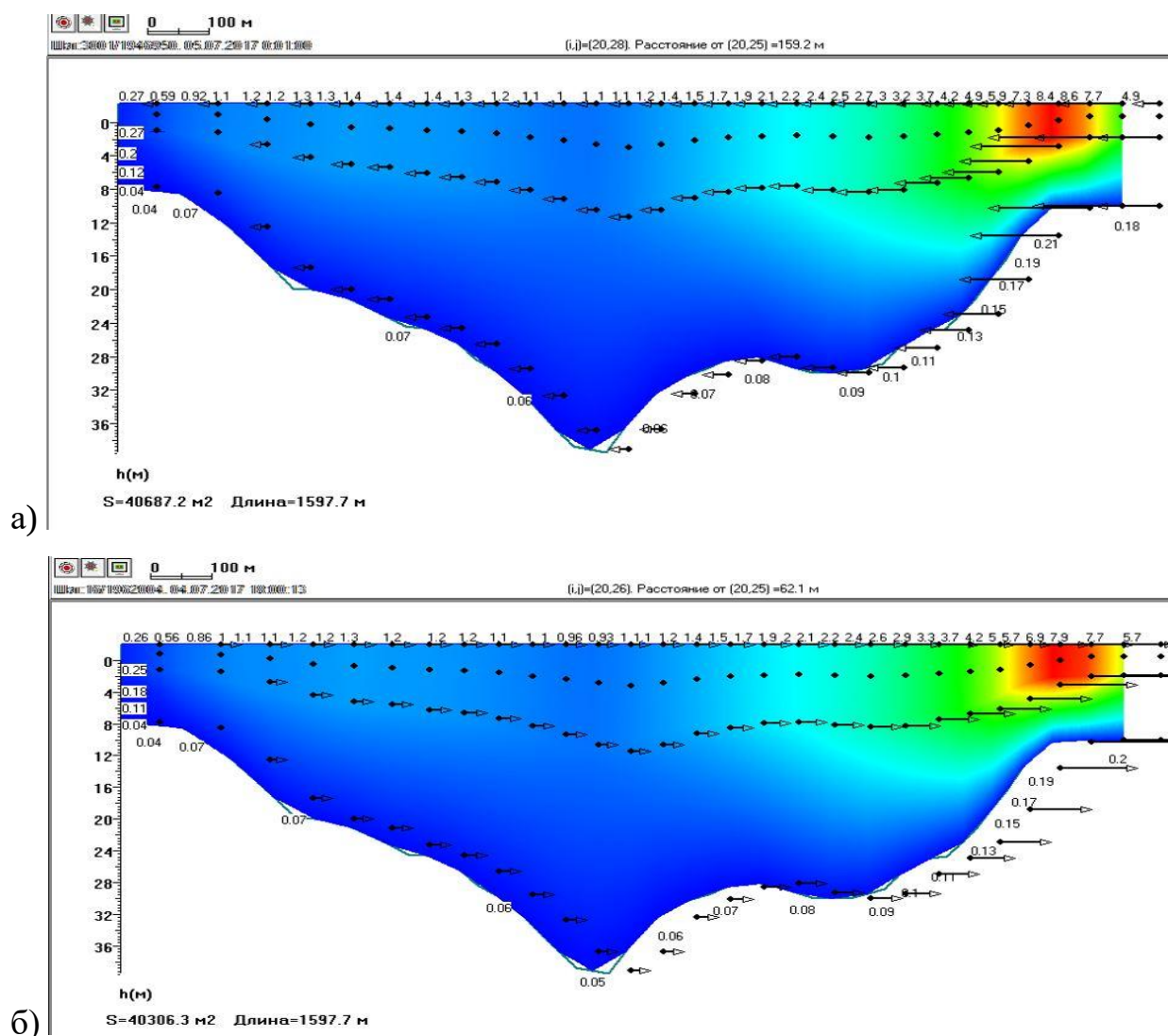


Рисунок 16 Скорости течения на разрезе при приливе (а) и при отливе (а). Без учета ветра

Второй эксперимент проводился при такой же ширине дамбы, но с добавлением фактора погоды. Были заданы скорость и направление ветра.

На этапе полной воды (рис. 17а) в целом скорости и направления течения повторяют результаты первого эксперимента (рис. 14), ключевым отличием можно отметить снижение количества «застойных» зон по акватории. Направление течений – с севера на юг, предельная скорость так же до 15 см/с, с постепенным снижением по мере удаления от дамбы (северный ветер, 3-5 м/с).

Во время отлива (рис. 17б) направление меняется на противоположное, вода стремится покинуть акваторию, скорости течений до 75 см/с. Так же стоит отметить снижение площади неподвижных вод.

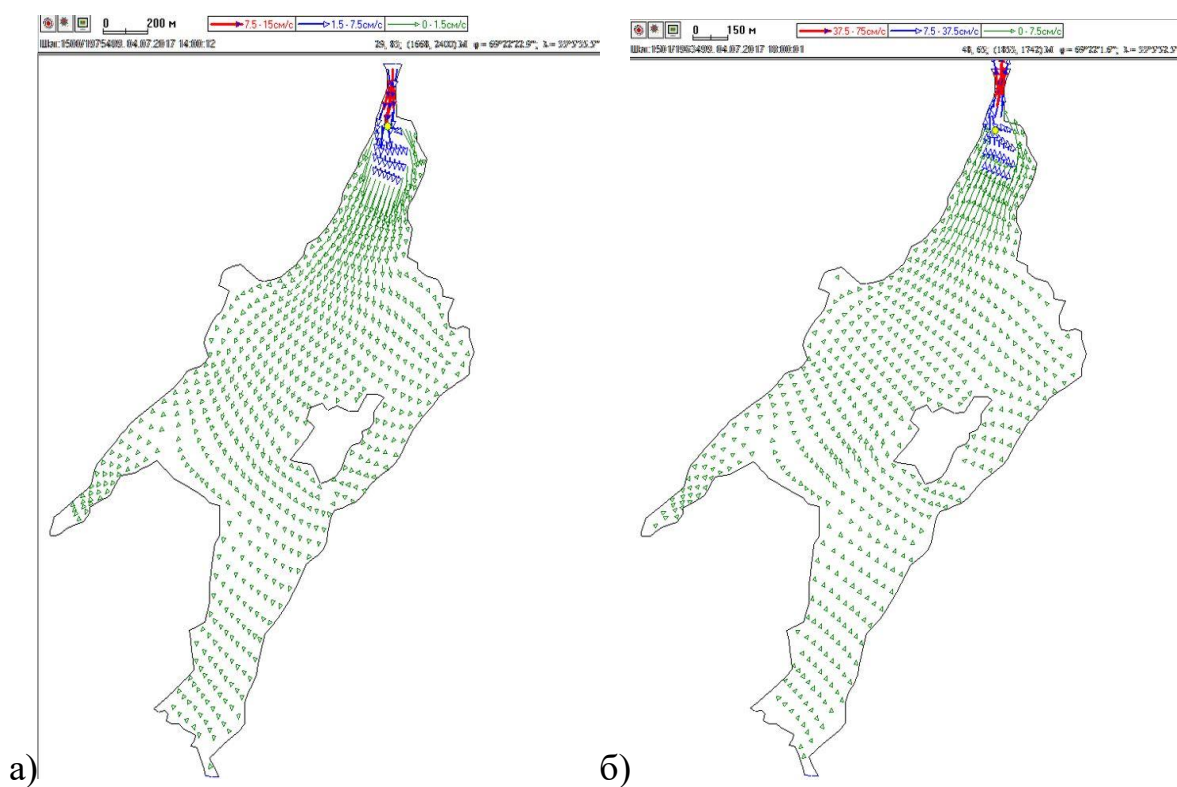


Рисунок 17 Направления и скорости течений при полной воде(а) и отливе(б).

С учетом действия ветра, поверхностный слой

Более интересные изменения наблюдаются на этапе малой воды (рис. 18а), когда фиксируется фаза стояния воды – абсолютные скорости течений не велики. Однако из-за действия ветра наблюдается незначительное увеличение скорости движения воды с севера на юг.

На этапе прилива (рис. 18б) направления скорости течения, и расположение застойных зон полностью идентичны результатам первого эксперимента, что указывает на низкую скорость ветра в этот период (северный ветер, 3-5 м/с).

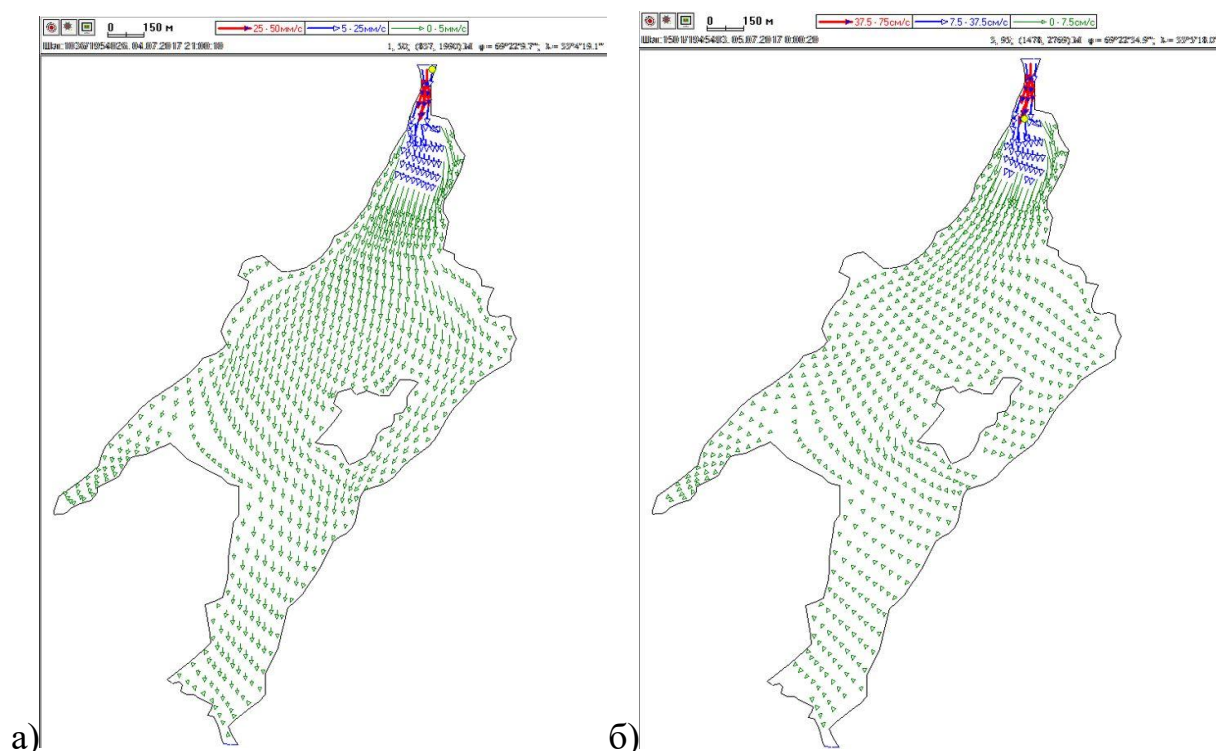


Рисунок 18 Направления и скорости течений при малой воде(а) и приливе(б).

С учетом действия ветра, поверхностный слой

На разрезе (рис. 16б и 19) видно, что в целом данные первого и второго эксперимента совпадают, хотя в эксперименте с добавлением ветра чуть большие скорости (до 1 см/с), что особенно существенно в период низкой воды, когда абсолютные скорости крайне незначительны, и скорость течения за счет ветровых воздействий выросла более чем в двое.

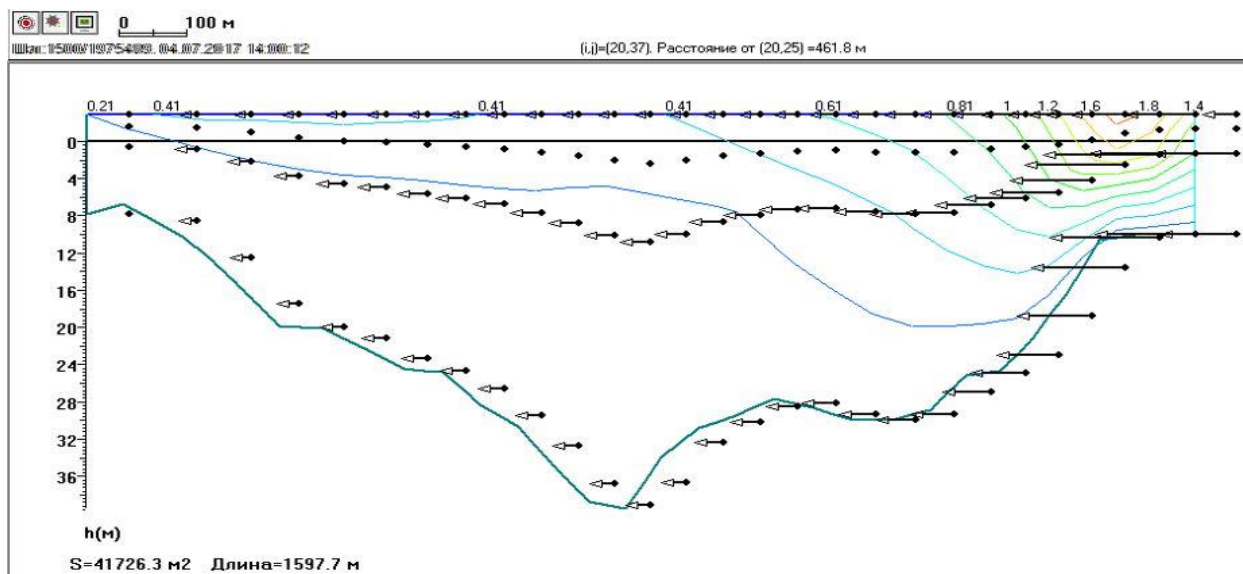


Рисунок 19 Разрез с изолиниями скоростей течений при полной воде. С учетом действия ветра

Во время третьего эксперимента (рис. 20-21) был использован сценарий, при котором дамба была открыта лишь частично (минимальный водообмен), однако на модели это не привело ни к каким значимым изменениям. Единственное заметное изменение — это разница в направлении течения воды непосредственно у дамбы. При этом на разрезе, который начинается на некотором удалении от дамбы никаких изменений не фиксируются, изолинии скоростей четко совпадают и по значениям, и по расположению.

Во время четвертого эксперимента были добавлены значения температуры воды и солености в начальный момент времени на основании параметризации данных натурных наблюдений 2000 года (формулы 1, 2). При этом температура воды интерполирована по глубинам, но из динамического расчета исключена, соленость же напротив просчитывалась на протяжении всего эксперимента. Важно отметить, что на юге губы, в зоне впадения ручья, задавалась нулевая соленость. В створе дамбы соленость задавалась равной 34.5 ‰.

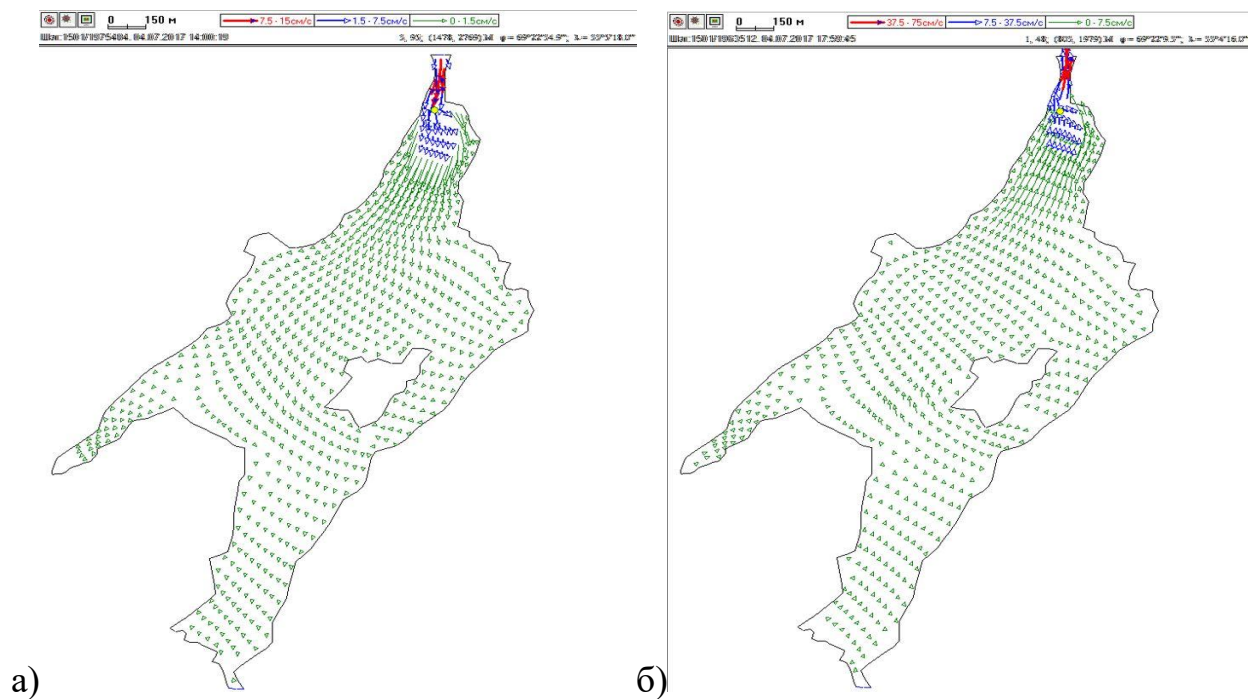


Рисунок 20 Направления и скорости течений при полной воде(а) и отливе(б).
С учетом действия ветра, поверхностный слой, узкий водопропускной канал
дамбы.

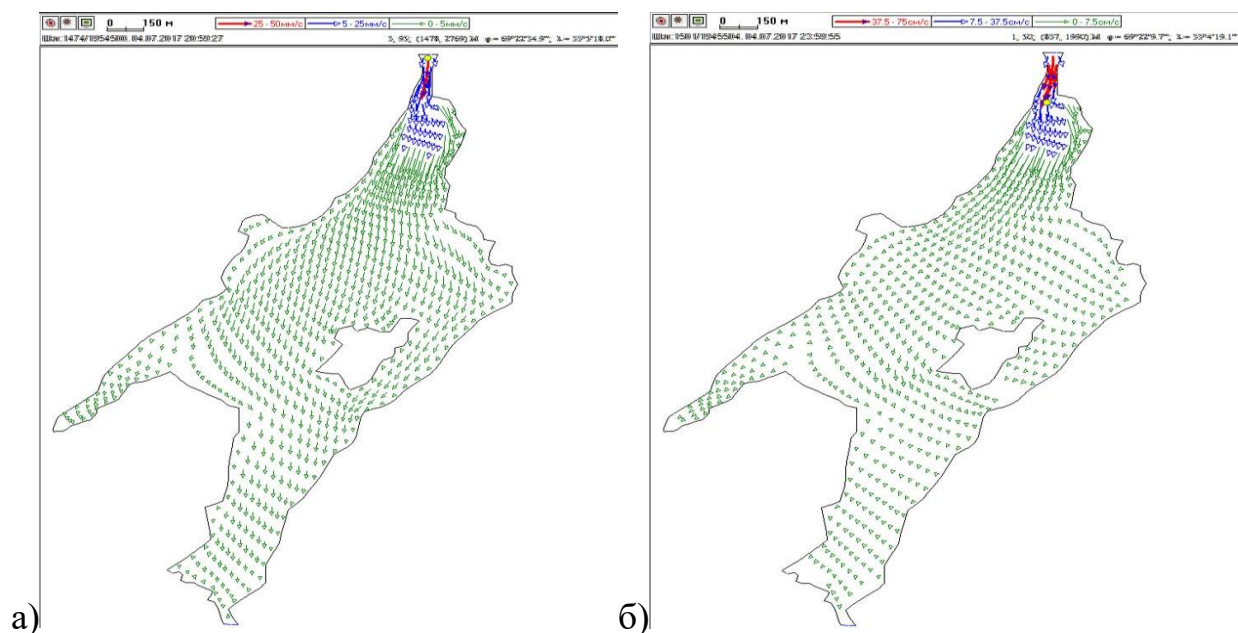


Рисунок 21 Направления и скорости течений при малой воде(а) и приливе(б)
С учетом действия ветра, поверхностный слой, узкий водопропускной канал
дамбы.

На высокой воде (рис. 22а) сразу ниже горла губы наблюдается движение воды в обратном направлении, в центральной части и южнее верхний слой воды по всей губе движется преимущественно с севера на юг. Скорость течения близ дамбы достигает 50 см/с, на небольшом отдалении, и в центральной части севера и юга находится в диапазоне 5-25 см/с.

На втором слое (рис. 22б) движение воды близ горла схоже с движением в первом слое, при этом в целом в акватории движение потоков разнонаправленное, но в целом преобладает движение с севера на юг, фактически обратно первому слою. Скорости течений меньше, чем в первом слое, возле дамбы и близ горла достигает 40 см/с, а в большей части акватории не превышает 20 см/с.

На третьем слое ярко (рис. 23а) выраженное движение водной массы наблюдается только в северной части (до 15 см/с) а попадая в более широкую область существенно замедляется, при этом в северной части движение происходит с севера на юг, тогда как на юге – с юга на север.

На четвертом (рис. 23б), придонном слое движение в значительной степени отмечается только в непосредственной близости дамбы, а также на южном речном стоке, в большей части акватории скорость около нуля.

По изолиниям солёности (рис. 24) видно, как через дамбу прибывает вода повышенной солености (34.5‰), постепенно распресняясь менее солеными водами Кислой губы. Противоположное явление наблюдается на юге губы, где задан расход пресной воды, вытекающей из озера. Эти процессы наблюдаются во всех 4 слоях. В местах, где глубины больше, растёт и солёность вод. На 3 и 4 слоях изолинии (рис. 25) в центральной и южной части Кислой губы в целом повторяют изобаты, с глубиной повышается соленость. Изогалины 1 и 2 слоя (условно выше пикноклина) в целом схожи между собой, но при этом существенно отличаются от 3 и 4 слоя (условно ниже пикноклина).

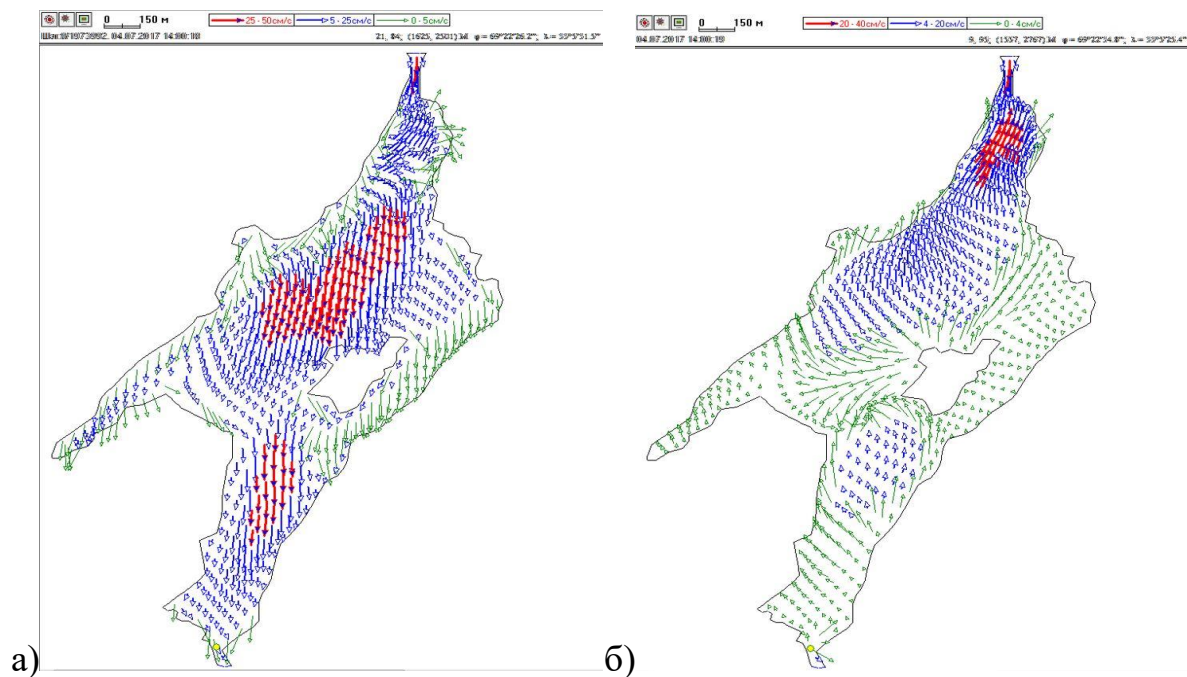


Рисунок 22 Направления и скорости течений при полной воде на 1(а) и 2(б) слое. С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

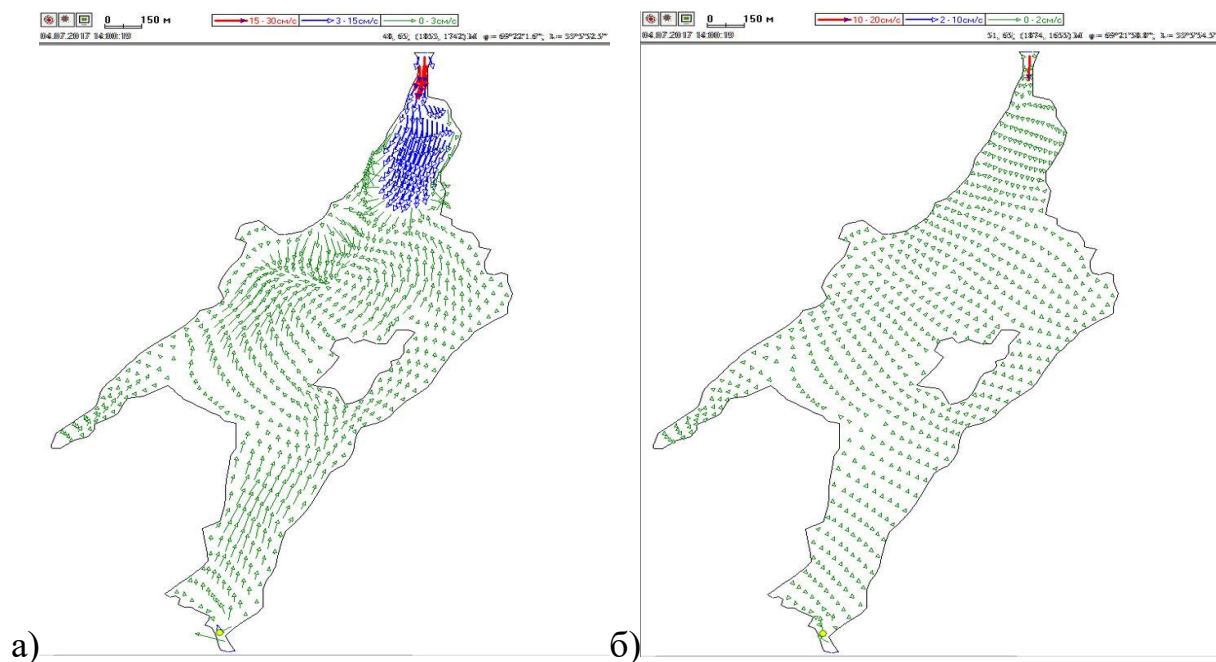


Рисунок 23 Направления и скорости течений при полной воде на 3(а) и 4(б) слое. С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

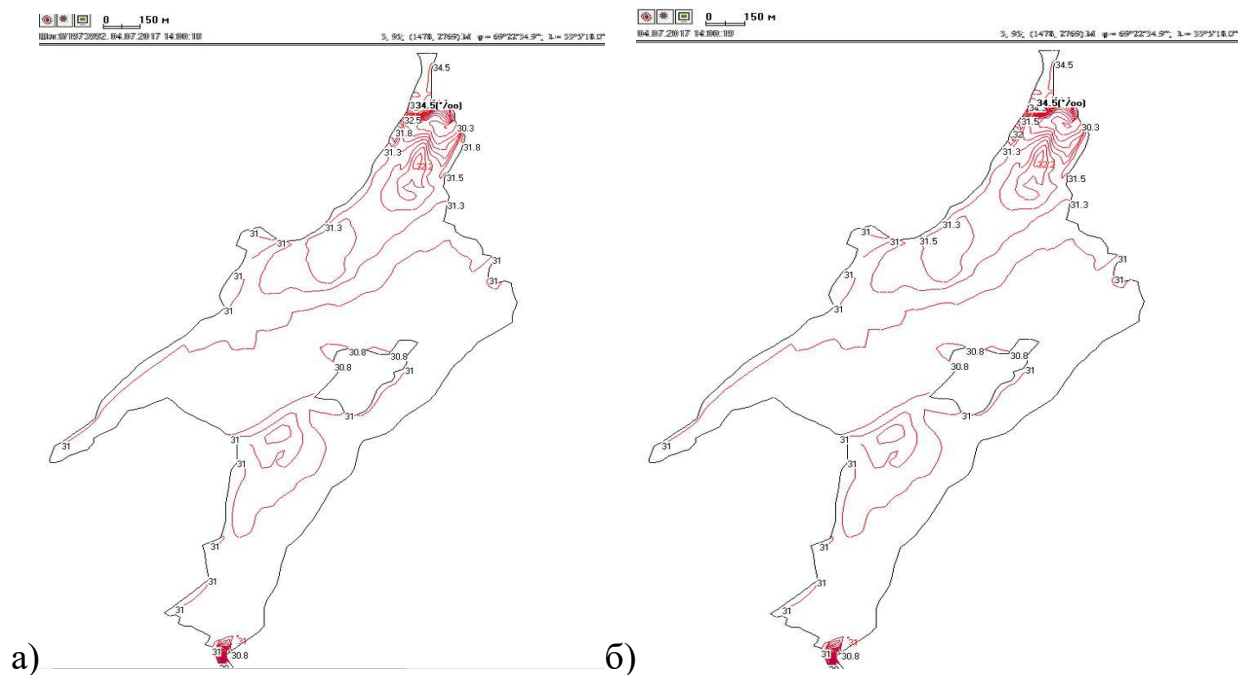


Рисунок 24 Изогалины при полной воде в слое 1 (а) и в слое 2 (б). С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

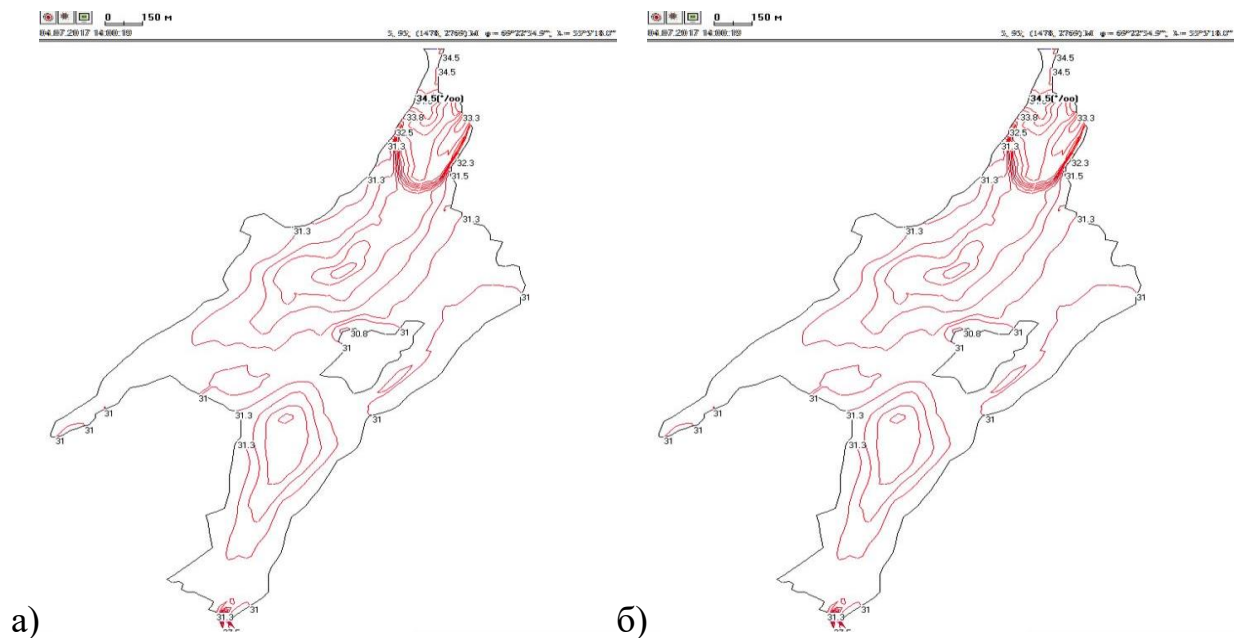


Рисунок 25 Изогалины при полной воде в слое 3(а) и в слое 4(б). С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

Во время отлива в поверхностном слое (рис. 26а) наблюдается отток воды через дамбу, и вдоль западного берега, при этом в центральной и южных частях Кислой губы вода напротив, устремлена на юг. Скорость в горле губы достигает 150 см/с, по мере расширения замедляется приблизительно до 20 см/с, однако в широкой северной части происходит ускорение течений вплоть до 75 см/с, в пороговой части замедляется до 15 см/с, после чего близ южной котловины опять ускорится до 75 см/с.

На втором слое (рис. 26б) наблюдается движение исключительно с юга на север, близ дамбы до 150 м/с, в остальной акватории, в зависимости от расположения – в узких и мелководных местах движение быстрее, в глубоких и широких – медленнее, в целом в этих местах скорость колеблется в диапазоне от 1 см/с до 75 см/с, скорости выше на севере, где ниже глубины, и уже губа.

На третьем слое (рис. 27а) явно выраженное направление течения только близ дамбы, скорости до 150 см/с, однако уже на незначительном удалении резко падают до 15 см/с, а дальше и вовсе не превышают нескольких метров в секунду. Направление в целом по акватории имеет турбулентный характер.

На четвертом слое (рис. 27б) присутствуют две струи: вода, покидающая акваторию через дамбу, со скоростью до 75 см/с, и вода прибывающая в акваторию через ручей, впадающий в губу, скорость потока до 7.5 см/с. Во всей остальной акватории вода практически неподвижна.

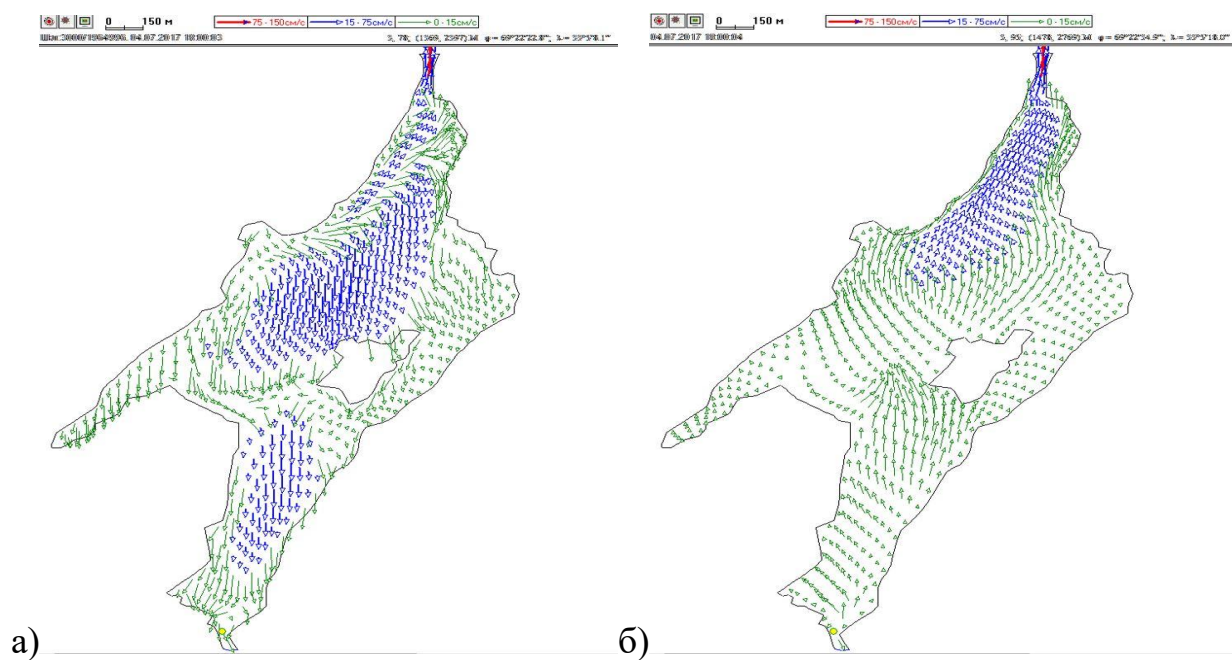


Рисунок 26 Направления и скорости течений при отливе в слое 1 (а) и в слое 2 (б). С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

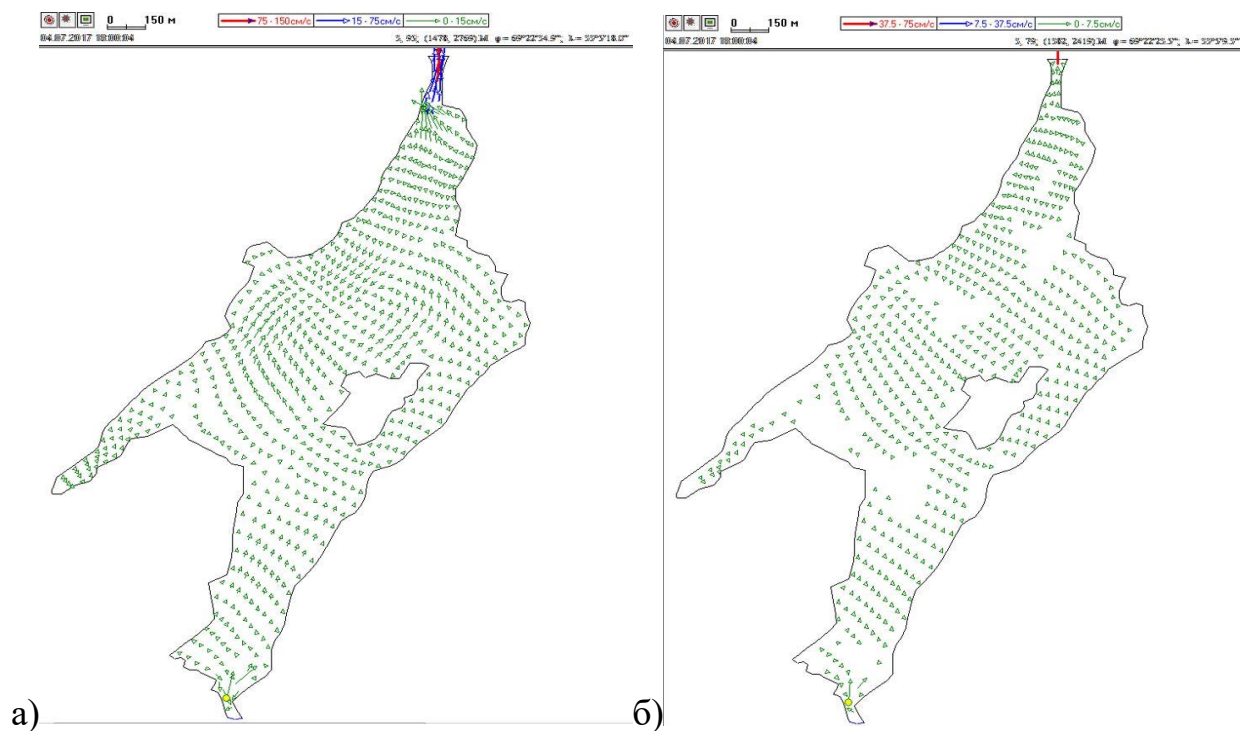


Рисунок 27 Направления и скорости течений при отливе в слое 3 (а) и в слое 4 (б). С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

На этапе отлива соленость вод становится более однородной по всей акватории, находясь в диапазоне 31-31.5 ‰, за исключением южного стока из пресноводного озера, где соленость падает ниже 31 ‰. По слоям ключевым отличием 1-2 слоев (рис 28а) от 3-4 слоев (рис 28б) является глубины с повышенной соленостью свыше 33 ‰. В целом распределение изогалин 1 и 2 слоя схожи, но при этом существенно отличаются от 3 и 4 слоев, которые в свою очередь практически не имеют отличий между собой.

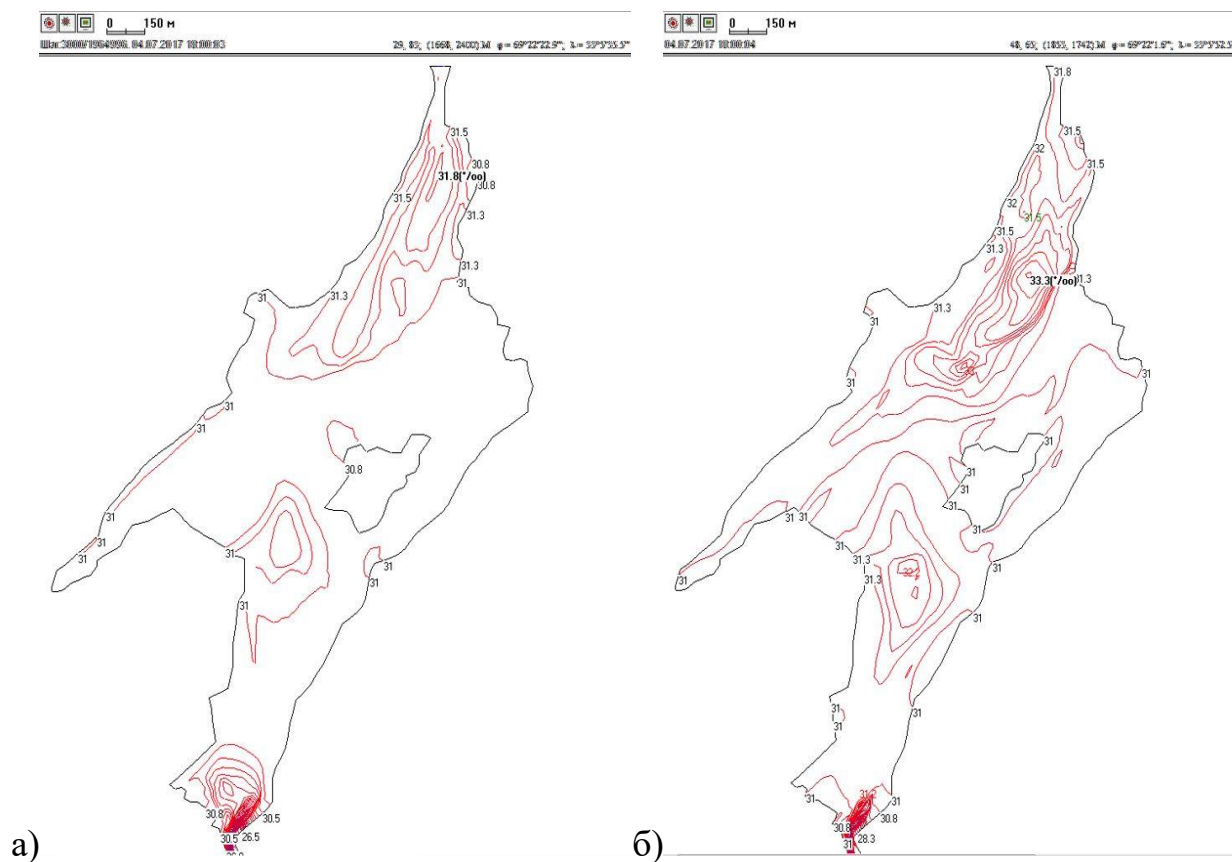


Рисунок 28 Изогалины при отливе на поверхностном(а) и придонном(б) слое.

С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

Во время малой воды в поверхностном слое (рис. 29а) наблюдается преобладающее движение с севера на юг, наивысшие скорости течения в области котловин до 60 см/с с постепенным замедлением к периферии.

На втором слое (рис. 29б) движение течений направлено в противоположную сторону, с юга на север, наибольшие скорости у северной котловины и в сторону горла губы, наблюдается изменение скорости в сторону уменьшения и направления течения на порогах, близ о. Тюлений.

На третьем слое (рис. 30а) наблюдается движение вод с севера и юга к центру при скорости преимущественно до 7.5 см/с или ниже. Наивысшие скорости при этом наблюдаются на юге, где находится сток ручья.

На четвертом слое (рис. 30б) вода практически неподвижна лишь в области дамбы на севере и в месте стока ручья есть незначительное движение в пределах 1 см/с

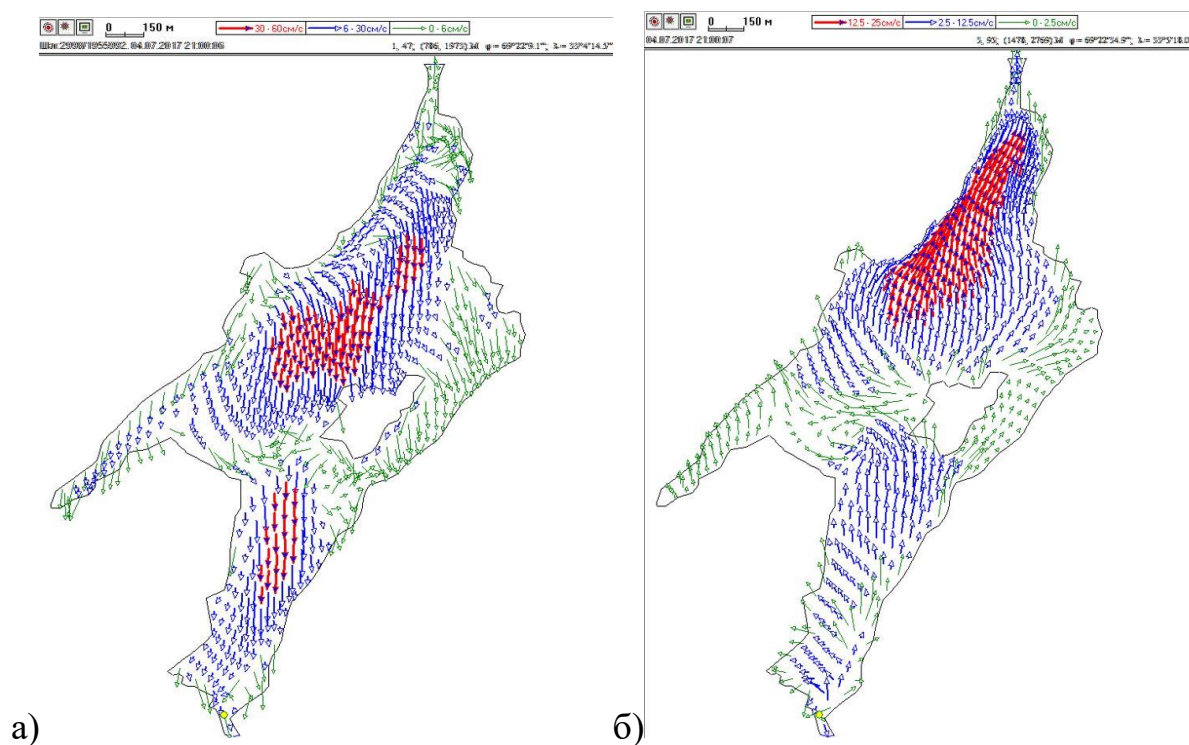


Рисунок 29 Направления и скорости течений при малой воде на 1(а) и 2(б) слое. С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

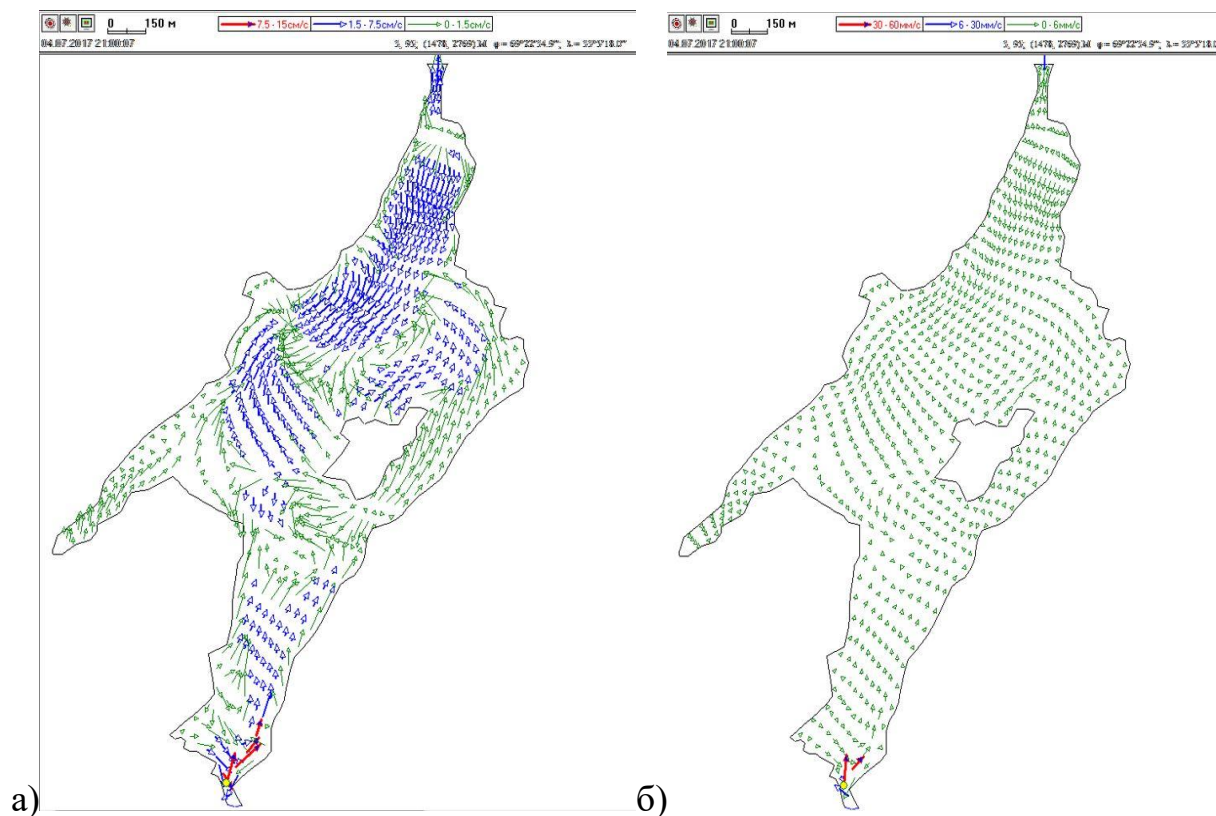


Рисунок 30 Направления и скорости течений при малой воде на 3(а) и 4(б) слое. С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

Во время этапа малой воды соленость (рис. 31а) в акватории в целом схожа с этапом отлива – почти повсеместно соленость находится в диапазоне 31-31.6 ‰, за исключением южного речного стока, где в поверхностном слое соленость по изогалинам 27.3 ‰, тогда как на глубинных слоях уже опускается до 26.5 ‰. Так же, в глубинных впадинах (рис. 31б) на юге соленость опустилась ниже 33 ‰.

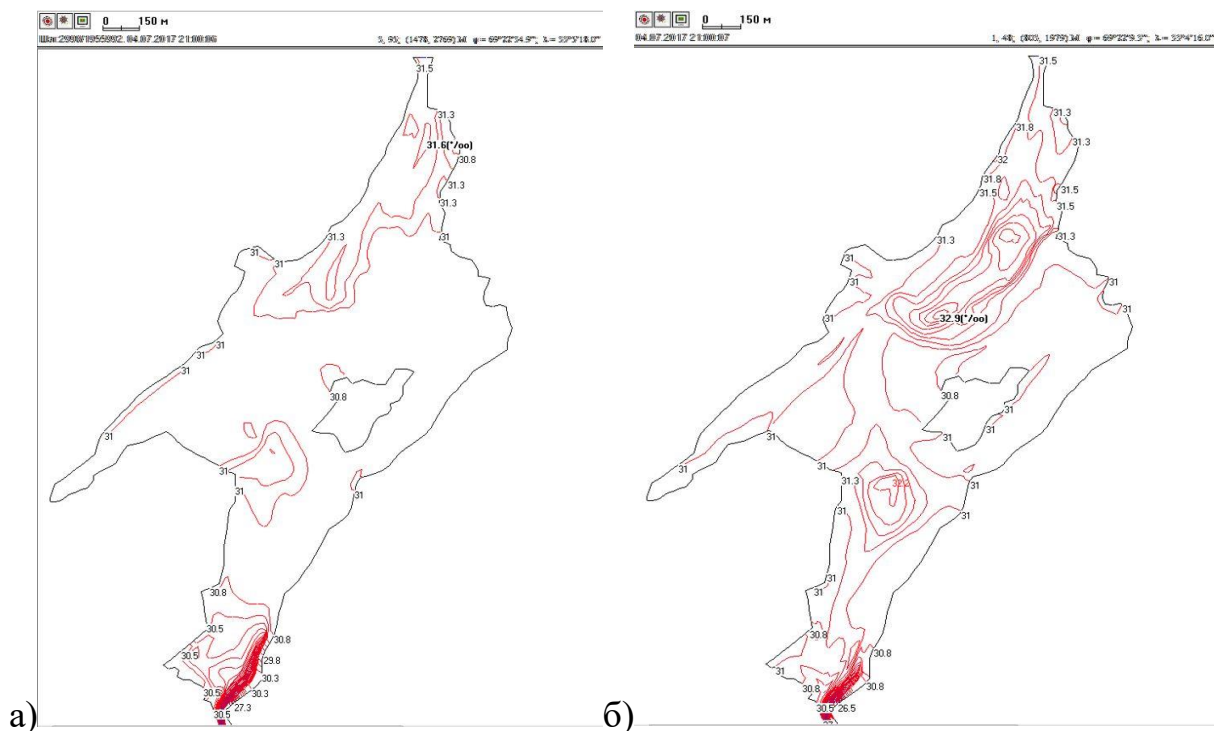


Рисунок 31 Изогалины при малой воде на поверхностном(а) и придонном(б) слое. С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

Во время прилива (рис. 32а) в поверхностном слое наивысшая скорость течения у дамбы, направление движения внутрь губы (до 150 см/с), но при первом же расширении акватории направление течения меняется на противоположное, однако уже в центральной части, равно как и на остальной площади вновь начинает преобладать течение на юг.

Во втором слое (рис. 32б) аналогично первому, наивысшая скорость близ дамбы, внутрь губы, однако далее по всей акватории наблюдается течение с юга на север, преобладающие скорости в диапазоне 10-20 см/с

В третьем слое (рис. 33а) движение наблюдается преимущественно в северной части, и только в южном направлении скорости до 150 см/с у дамбы, постепенно снижаясь до значений в пределах 15 см/с к центральной части.

В четвертом слое (рис. 33б) течение в большей части акватории отсутствует, исключение – приливной поток у дамбы, и сток реки, скорости до 75 см/с и 7.5 см/с соответственно.

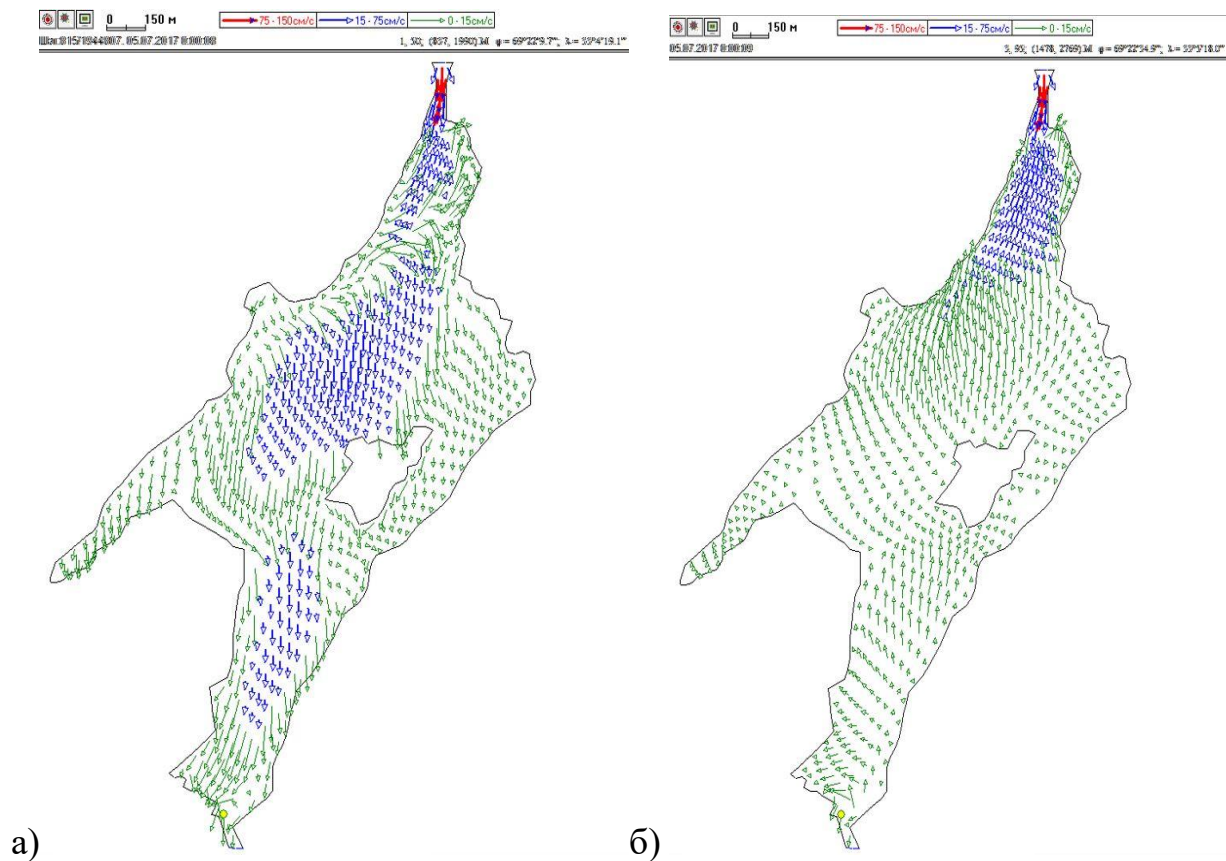


Рисунок 32 Направления и скорости течений при приливе в слое 1 (а) и в слое 2 (б). С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

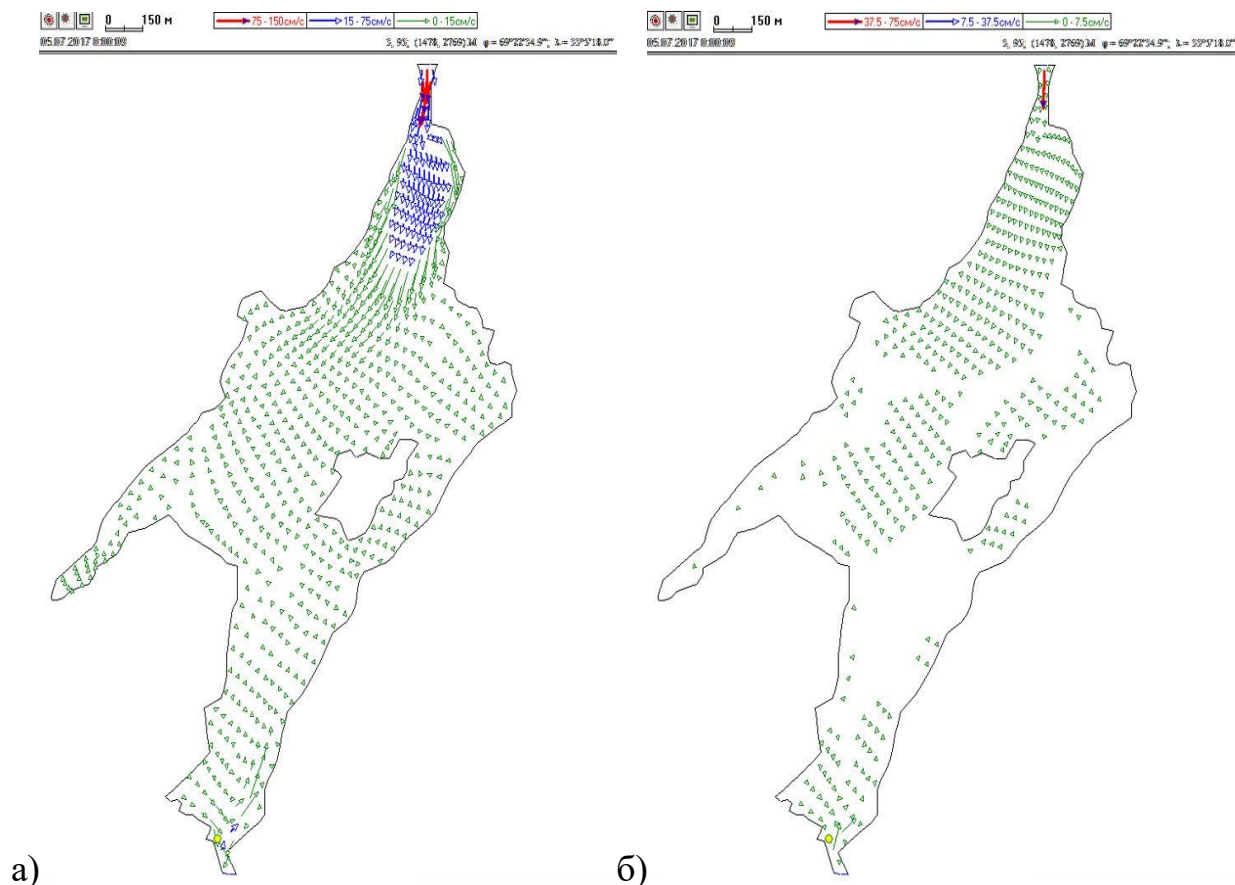


Рисунок 33 Направления и скорости течений при приливе в слое 3 (а) и в слое 4 (б). С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

Во время прилива наблюдается (рис. 34а) активный рост солёности на севере с притоком солёной воды Баренцева моря, при этом на глубинах (рис. 34б) рост происходит интенсивнее чем на поверхности. На юге наблюдается продолжающийся рост распресненной водной массы из-за стока пресного озера, что может объясняться недостаточным предварительным расчетом (система не сбалансировала халинную динамику). По отличиям между слоями без изменений – 1 и 2 слоя идентичны, равно как и 3-4 слоя между собой.

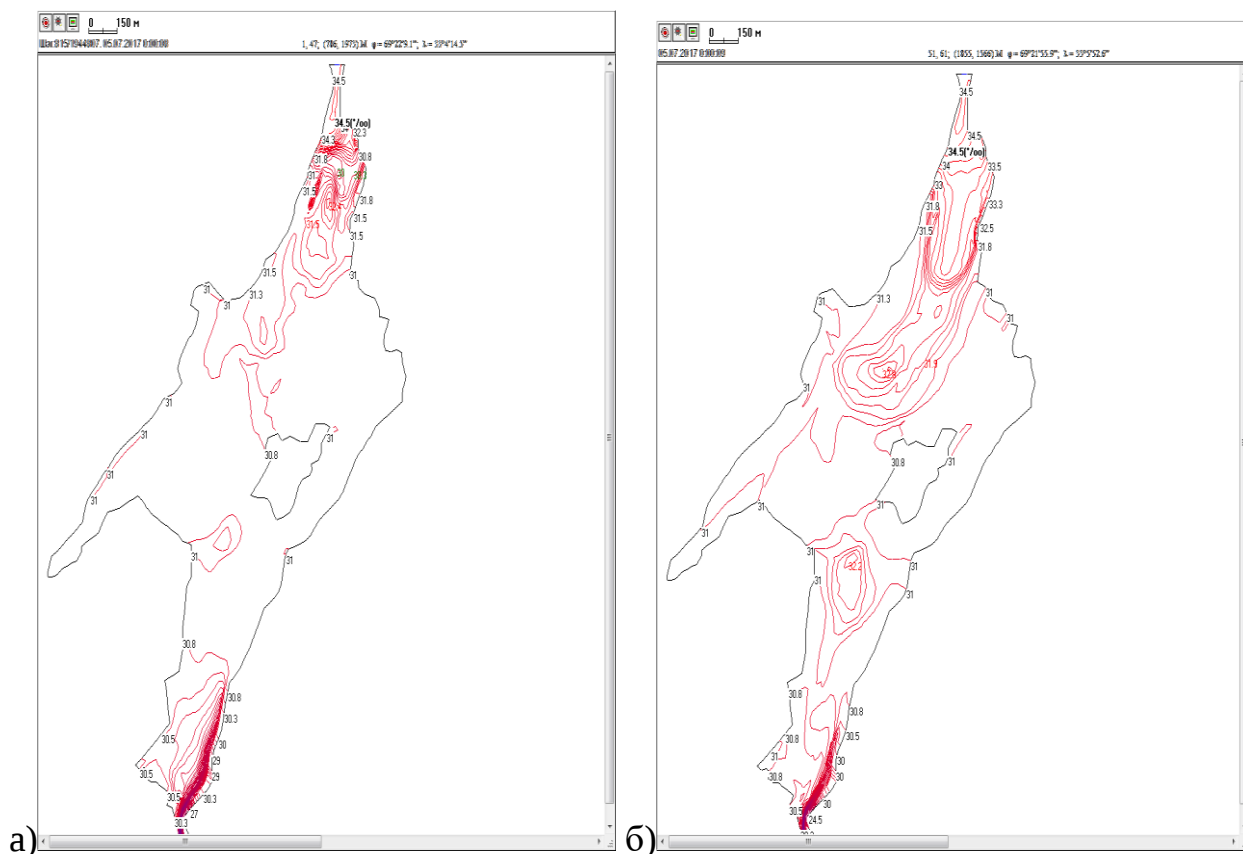


Рисунок 34 Изогалины при приливе на поверхностном(а) и придонном(б) слое. С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

На разрезах, сделанных во время отлива (рис. 35) и прилива (рис. 36) хорошо видна изменчивость направлений течений по слоям, поверхностный слой не имеет какой-то постоянной траектории, что свидетельствует о турбулентном движении водной массы. Второй слой более стабилен, и на обоих разрезах практически на всей площади движется с юга на север, и лишь за котловиной меняет направление. Третий слой на разрезе во время отлива не имеет выраженного направления, а во время прилива движется четко вглубь губы Кислая. Придонный слой во время отлива стремится попасть в котловину (с севера течет — на юг, с юга — на север) смена азимута проходит точно по котловине, а во время прилива — так же, как и третий слой, в глубь акватории.

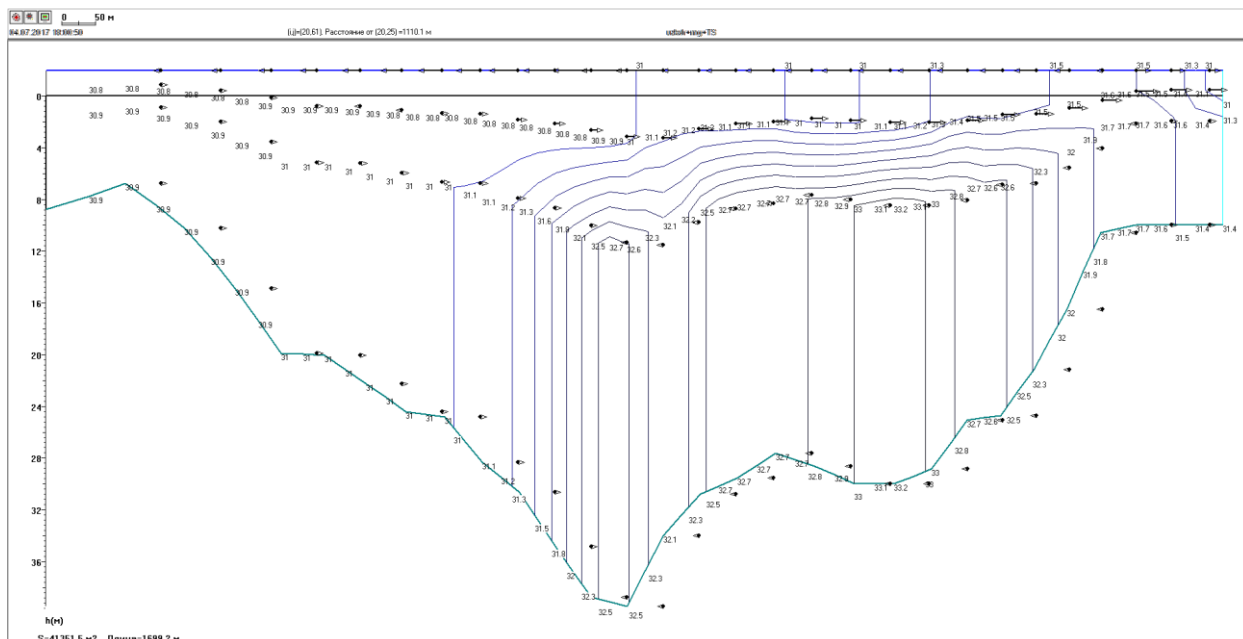


Рисунок 35 разрез с изогалинами и векторами течений на фазе отлива. С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

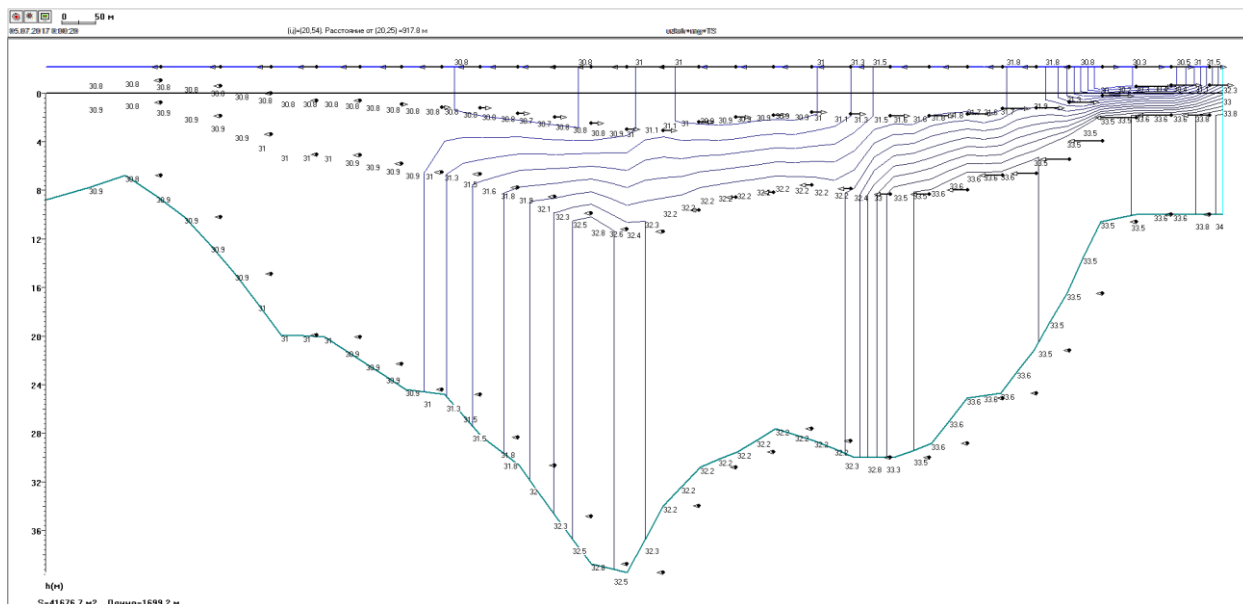


Рисунок 36 разрез с изогалинами и векторами течений на фазе прилива. С учетом действия ветра, добавлении термохалинной составляющей, узкий водопропускной канал дамбы

Таким образом, выполненная серия численных экспериментов показала, что наибольший вклад в гидродинамические процессы вносит термохалинная составляющая, т.к. именно четвертый эксперимент показал наиболее существенные отличия. Первый эксперимент показал ход уровня и течений при минимальном количестве условий, второй – влияние ветра на скорость и направления течения, третий эксперимент несущественность влияния изменения водопропускного канала дабмы с условием влияния ветра, а четвертый – значимость термохалинности которая приводит к разделению водных масс по слоям, противонаправленному движению водных масс и стратификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была подготовлена физико-географическая характеристика Кислой губы, приведены исторические данные о ходе строительства и эксплуатации Кислогубской ПЭС. Проанализированы особенности приливного режима и другие гидродинамические процессы. Для работы в ПК CARDINAL был проведен сбор метеорологических и гидрологических данных с дальнейшим анализом, выявлен наиболее подходящий год для работы математической модели Кислой губы. Изначально, предполагалось большее внимание уделить изменению уровня моря под влияние приливо-отливных колебаний, ветрового воздействия, а также термохалинной структуры водоема. Сформирована расчетная сетка, нанесены глубины, заданы граничные и начальные условия, после чего были произведены эксперименты по нескольким моделям. Полученные результаты подробно проанализированы.

В ходе экспериментов для акватории Кислой губы пространственные изменения уровня были незначительными. Разница уровня между крайними точками северной и южной частей губы достигала 20 см, сдвиг по времени наступления экстремумов составлял от 30 минут до 1 часа. Следует отметить, что за исключением узкого горла Кислой губы уровень моря поднимался практически синхронно.

В ходе первого эксперимента была воспроизведена приливо-отливная динамика уровня (амплитуда ~ 2 м) и пространственное распределение скоростей течений (максимумы до 75 см/с локализуются в горле губы и у плотины ПЭС). В ходе второго эксперимента было учтено влияние ветра. Ветровое воздействие вносит незначительную асимметрию в фазы прилива/отлива, сокращает площадь застойных зон, увеличивает скорости течений главным образом в поверхностном слое. Третий эксперимент с изменением режима работы водопропускных сооружений оказывает

локальное влияние только в непосредственной близости от плотины, что указывает на слабое влияние ограниченного режима водообмена на акваторию. В ходе четвертого эксперимента была добавлена термохалинная компонента, что привело к сильной стратификации водных масс, появлению более интенсивных процессов перемешивания особенно в поверхностном слое, и наглядно демонстрировало изменения солёности в акватории в ходе приливно-отливных процессов. Сравнение результатов экспериментов с натурными данными показало, что при комплексном учете действующих факторов скорости течения были сопоставимы с указанными в литературных источниках.

Необходимым развитием модели является включение термического блока с расчетом изменения температуры и вертикальной структуры водоема с учетом этого фактора.

Полученная модель может стать основой геоинформационного двойника для проведения различных сценарных расчетов, в том числе по распространению примесей в пределах акватории

Список использованных источников

1. Усачев, И.Н. значение Кислогубской ПЭС для российской гидроэнергетики / И.Н. Усачев // Гидротехника .— 2014 .— №2 .— С. 27-34
2. Несветова Г.И., Бойцов В.Д. Экологические изменения в губе Кислая Баренцева моря под влиянием приливной электростанции // Заполярная марикультура. Мурманск: ПИНРО, 1994. С. 18-38.
3. Шилин М.Б. Кислогубская приливная электростанция: возвращаясь снова и снова// Ученые записки 11 2009 С. 101-111
4. Особенности биологии атлантической трески Мурманского побережья: расовый состав и промысел, А. Н. Строганов, Н. А. Ярагина, 2023, Биология моря № 5, стр. 319-332
5. Разработка комплексного гидрометеорологического обеспечения эксплуатации хозяйств марикультуры и промысла гидробионтов в районе опытных полигонов в прибрежной зоне Белого и Баренцева морей. Отчет о работах РГГМИ в губе Палкина Кандалакшского залива Белого моря и губе Кислая Баренцева моря в 1994 г. и в губе Кислая Баренцева моря в 1995 г., 1996. – СПб: Рукопись кафедры океанологии РГГМИ, 1996. – 89 с.
6. Атлас Мурманской области / Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР. – Москва, 1971. – 33 с.
7. Бернштейн Л.Б. Кислогубская приливная электростанция // Гидротехническое строительство. – 1970. – № 10. – С. 27–29.
8. Бернштейн Л.Б. Приливные электростанции в современной энергетике. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 271 с.
9. Бернштейн Л.Б. Приливные электростанции / В.Н. Силаков, С.Л. Гельфер. – М.: АО «Институт Гидропроект», 1994. – 568 с.
10. Семенов В.Н., Жуков Е.И., Кондаков А.А., Мокиевский В.О. Некоторые последствия сооружения приливной электростанции в губе Кислой Баренцева моря // Тез. док. Всесоюз. конф. «Природная среда и проблемы

изучения, освоения и охраны биологических ресурсов морей СССР и Мирового океана». – Ленинград, 1984. – С. 40–41.

11. Семенов В.Н. Виды антропогенного воздействия на морские экосистемы и некоторые способы их выявления. – Апатиты, 1991. – 240 с.

12. Семенов В.Н. Изменение экосистемы под влиянием Кислогубской приливной электростанции на побережье Баренцева моря // Тез. док. межд. конф. «Совр. состояние и перспективы исследований экосистем Баренцева, Карского морей и моря Лаптевых». – Мурманск, 1995. – С. 84–86.

13. Альтшулер В.М., Гурвич В.М. Лунные ритмы. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 128 с.

14. Гордеева С.М., Провоторов П.П. Общая океанология. Часть I. Физические процессы: Практикум. – СПб.: РГГМУ, 2001. – С. 27–30.

15. Малютин О.И. Изменение бентосных сообществ бассейна Кислогубской ПЭС, связанные с ее строительством и эксплуатацией // Тез. док. межд. конф. «Совр. состояние и перспективы исследований экосистем Баренцева, Карского морей и моря Лаптевых». – Мурманск, 1995. – С. 58–59.

16. Федоров К.Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – С. 74–78.

17. Клеванный К.А. CARDINAL. Руководство пользователя. – 2021. – 213 с.

18. База данных «Расписание погоды».- URL: <https://rp5.ru/> (дата последнего обращения 16.06.2026)

19. Официальный сайт Informer Technologies, Inc. URL: <https://wxtide32.informer.com/> (дата последнего обращения 16.06.2026)

20. Официальный сайт ПК CARDINAL SOFT – URL: <http://cardinal-hydrosoft.ru/> (14.06.2026)