



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

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему Исследование особенностей колебания уровня моря в Обской губе

Исполнитель Сидорова Любовь Дмитриевна

(фамилия, имя, отчество)

Руководить 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)

« ___ » _____ 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

Содержание

	стр.
Введение	3
1 Физико–географическое описание района исследования	5
1.1 Обская губа	5
1.2 Тазовская губа	10
1.3 Исследуемые характеристики	11
2 Материалы и методы	16
2.1 Постановка задачи математического моделирования колебаний уровня моря в Обской губе с использованием программного комплекса CARDINAL	16
2.2 Граничные условия	20
2.3 Метод исследования ветра	23
2.4 Оценка качества полученных результатов	26
3 Результаты численных экспериментов по расчету уровня моря в Обской губе с использованием программного комплекса CARDINAL	28
3.1 Исследование колебаний уровня моря в Обской губе	28
3.2 Исследование ветровой обстановки в Обской губе	48
Заключение	53
Список литературы	55
Приложение А Расчетная область гидродинамической модели Обской губы	59
Приложение Б. Результаты численного эксперимента №7	60
Приложение В Результаты численного эксперимента №11	62

Введение

Значимость исследование Карского моря и, в частности, Обской губы в 21 веке сильно возрастает, в связи с бурной хозяйственной деятельностью, строительством новых портов, добычей нефти и газа. Исследование колебаний уровня и скорости течений являются очень важной частью обеспечения морской хозяйственной деятельности, в том числе судоходства, гидростроительства. Существует немало исследований этого района с результатами обработки натуральных, стационарных, экспедиционных данных [1-6]. Основная часть исследования уровня направлена на получение зависимостей для прогноза уровня моря или превышение приливов [7-10]. Однако, математическим моделированием колебания уровня данного залива исследователи занимались не так много [11,12], хотя при моделировании колебания расширяются возможности прогнозирования. Это и определяет актуальность исследования колебаний уровня Обской губы с использованием математического моделирования.

Целью выпускной квалификационной работы было провести исследование особенностей колебания уровня моря в Обской губе с использованием программного комплекса CARDINAL

Основные задачи работы:

1. проанализировать опубликованные работы в области гидрологических и гидрохимических исследований Обской губы, и на основе этого составить физико-географическое, гидрологическое и гидрохимическое описание района;
2. использовать программный комплекс CARDINAL для создания математической модели гидродинамического режима Обской губы;
3. создать и обработать массивы данных о ходе расходах и уровнях рек, впадающих в Обскую губу, о направлении и скорости ветра в исследуемом районе для задания граничных условий и верификации полученных результатов;

4. выполнить численные эксперименты с различными условиями для временного промежутка с мая по октябрь 2019 года;

5. оценить качество проделанной работы с помощью сравнения полученных результатов с натурными данными на мысе Каменном (Новом порту), предоставленных ООО «Арктик Шельф Консалтинг».

1. Физико–географическое описание района исследования

1.1. Обская губа

Обская губа (рисунок 1.1) является самым крупным заливом Карского моря, а также эстуарием реки Обь. Простирается между полуостровом Гыданский и полуостровом Ямал. В восточной части Обской губы расположена Тазовская губа, в которую впадает река Таз.



Рисунок 1.1 Физическая карта Обской губы [13].

Обская губа вытянута вдоль 73 меридиана восточной долготы. Условно ее южная граница проходит от м. Ям-Сале до м. Жертв, а северная граница – условная линия между северо-западной частью о. Шокальского до м. Шайтанов.

По расположению в Российской Федерации Обская губа находится на территории Ямало-Ненецкого автономного округа, который входит в состав

Тюменской области. Ширина Обской губы меняется в диапазоне от 35 км до 90 км, а максимальная ширина достигается между мысом Шайтанов и островом Шокальского, т.е. на северной границе, а минимальная между мысами Каменный и Парусинный в центре губы. Длина залива составляет 800 км, а протяженность берегов с обеих сторон около 1000 км. Водная площадь – 55,5 тыс. км², объем – 445 км³ [13,14].

Если рассматривать Обскую губу, как район Карского моря, то он самый мелководный, и его дно достаточно ровное. Это можно объяснить большим выносом песка и ила из реки Обь. Ложе Обской губы достаточно ровное без резких колебаний глубин. Значения глубин уменьшаются с севера на юг. У северной границы они достигают 20-25 метров, а в южной части акватории – 3-5 метров.

Обскую губу принято делить на три части по гидрологическим и гидрохимическим особенностям - на северную, среднюю и южную. Южная часть располагается от бара р. Оби, который находится между мысом Сандиба и Ямсале до условной черты мыс Круглый – мыс Каменный. Далее на север от этой “линии” до реки Тамбей – мыс Таран – располагается средняя часть. А северная – до выхода в Карское море [15].

Воды рек Обь, Надым, Ныда – в юго-восточной части и небольшие реки – Яда, Оя, Ивоча, Зеленая – западная часть поступают в Обскую губу. Их сток обуславливает образование квазипостоянных течений, которые направлены с юга на север. Значения скоростей течения на всей акватории неравномерны. В северной части района от поселка Сабетта и выше скорости течений не превышают 10 см/с. Скорости течения в южной части значительно выше и варьируется от 20 до 25 см/с. И достигают своего максимума в 30 см/с в мае-июле, т.е. во время половодья [16].

Гидрологический режим. Гидрологический режим района складывается, в основном, стоками реки Обь, водообменом с Карским морем, а также значительной атмосферной составляющей, которая представлена стонно-нагонными колебаниями. Относительно пресные и теплые и соответственно

менее плотные воды рек, располагаются над более холодными и плотными водами, которые поступают из Карского моря. Это обуславливает вертикальную стратификацию водных масс. Особенно выражено влияние речного стока в июне, июле в период половодья.

Изменчивость гидрологического режима Обской губы хорошо выражена от сезона к сезону. Причина этого заключается в том, что действует больше количество факторов.

Изменение уровня воды зависит от целого ряда сил, которые можно разбить на 3 группы:

- силы, формирующие периодические колебания: приливообразующие силы, которые вызывают самостоятельные приливо-отливные колебания и отклоняющая сила вращения Земли;
- силы, вызывающие непериодические колебания: воздействие ветра на поверхность моря и губы, влияние стока речных вод, градиент атмосферного давления;
- силы трения, возникающие при движении водных масс в ложе потока [17].

В рассматриваемой акватории все силы действуют одновременно. Поток воды, который выходит из р. Обь и входит в Обскую губу повышается уровень воды в местах сужения залива, а при увеличении ширины губы уровень уменьшается. Навстречу потоку речных вод с севера распространяются приливные волны из Карского моря. В период, когда на акватории присутствует ледяной покров, колебания уровня сглаживаются.

Образование приливо-отливных колебаний в заливе обуславливается действием двух причин. Во-первых, это воздействие Луны и Солнца на водные массы, вызывающие горизонтальные перемещения, которые в свою очередь и являются причиной приливов и отливов. Во-вторых, так как акватория соединена с открытым морем, в ней возникают еще одни колебания, причиной их появления – приливо-отливные колебания Карского моря, они называются совместными приливо-отливами. Когда происходит переход волны морского (наружного)

прилива-отлива из большой области мелководья в губу, ее амплитуда увеличивается в 2 раза, при движении на юг под действием силы трения происходит затухание амплитуды поступательной волны [6,16].

На рассматриваемой акватории приливы в основном полусуточные. При движении приливной волны с севера на юг ее скорость и величина уменьшаются. Наступление сизигийных приливов на рассматриваемой акватории происходит чаще всего на 3-4 сутки после новолуния или полнолуния.

При активной циклонической деятельности можно наблюдать сгонно-нагонные колебания. При северных направлениях ветра наблюдается нагон, а, следовательно, при южных – сгон.

В Обской губе постоянными течениями являются как ветровые, так и приливные. Постоянные течения движутся на север и возникают благодаря речному стоку. Из-за непостоянства речного стока в течение года, скорость постоянного течения изменяется, а именно уменьшается от весны к осени. Направление приливных течений – на юг, а во время отливов – на север. Течения, вызванные ветром, имеют прямую зависимость от ветрового режима района. Этот вид течений может преобладать над приливными и постоянными при значениях ветра более 10 м/с, т.е. при сильных ветрах. Во время того, когда акватория покрыта льдом, а именно с ноября по май, преобладают южные и юго-западные ветры со средней скоростью 6-8 м/с, но из-за льда в этот период влияние ветра на течение пренебрежимо мало. Летом (июнь – август) в основном наблюдаются ветры с северных румбов, в большинстве своем северные и северо-западные со средней скоростью 5-7 м/с. Осенью (сентябрь-октябрь) наблюдаются западные ветры. В Обской губе самые волноопасные ситуации появляются при северных и южных ветрах, которые направлены вдоль ее оси [18, 19].

Гидрохимический режим Обской губы. В Обской губе смешиваются и совмещаются два типа вод – хлоридно-натриевые морские и карбоната-кальциевые речные. Это и является “маргинальным фильтром”. Данный термин был введен А.П. Лисицыным после работ 49-го рейса НИС

“Дмитрий Менделеев” (1993) в Обской губе и Енисейском заливе. В свою очередь под маргинальным фильтром понимают зону смешения речных и морских вод с соленостью от 0 до 20 ‰, в которой происходят качественное и количественное изменение растворенных и взвешенных веществ, поступающих с континента [20].

Более плотные морские воды по основной акватории губы постепенно растекаются по дну с севера на юг, постепенно трансформируясь под влиянием пресного стока. В северной части Обской губы соленые воды заполняют все от поверхности до дна, т.е. весь слой. Это связано с тем, что вертикальная структура этой части зависит, в основном от приливных явлений, которые путем перемешивания приводят к данной ситуации. Но при перемещении на юг толщина слоя морских вод становится меньше, благодаря опусканию верхней границы ко дну, что в свою очередь происходит из-за активного взаимодействия с пресными водами. Так как присутствует большой градиент плотности, вертикальное перемешивание достаточно слабо и, соответственно, происходит изоляция глубинных соленых вод от обмена с верхним слоем. Во время половодья, т.е. при резком увеличении количества речных вод, увеличивается сопротивление проникновению соленых вод. Это способствует смещению границы растекания морских вод ближе к Карскому морю. При уменьшении речного стока, а именно в зимней период и межень, эта граница сдвигается на юг ближе к устью р. Оби. Таким образом, сгонно-нагонные и приливные явления при снижении речного стока влияют на проникновения морских вод в Обскую губу [21].

В период половодья, а также в осенние паводки, значение солености поверхностного слоя резко уменьшается до 1 ‰. В летний период с июля по август соленость поверхностного слоя воды колеблется от 1 ‰ до 5 ‰. На глубине 3-4 метра соленость составляет 5 - 10‰. На глубинах 8 м и более (придонный слой) значение солености обычно превышает 20‰. К осени соленость воды увеличивается по всей толще, так как происходит уменьшение речного стока [22].

Ледовый режим. Начиная со второй декады октября, в акватории Обской губы происходит ледообразование. В некоторые, сильно холодные годы, в результате резкого и сильного похолодания начальные виды льда могут начинать образовываться во второй декаде сентября. Ближе к концу мая под действием солнечной радиации и речного стока начинается разрушения ледяного покрова. Взлом припая у северной кромки, который происходит из-за таяния, волнения и ветра приходится на первую половину июня.

1.2. Тазовская губа

Тазовская губа (рисунок 1.2) расположена между полуостровами Гыданским и Тазовским, и является заливом Обской губы Карского моря. Акватория губы и относящиеся к ней территории находятся в центральной части эстуария реки Обь. Ширина у входа – 45 км, а длина порядка 330 км. Тазовская губа – это затопленное продолжения долин рек Таз и Пур, которые в нее впадают. Акватория залива пресноводна [13].



Рисунок 1.2 Тазовская губа.

Гидрологический режим. Сильно выраженное действие речного стока на дельтовом участке Тазовской губы – от мыса Находка до устья реки Таз, и этот район является типично мелководным водоемом с глубинами до 3 м. В южной части акватории воздействие сгонно-нагонных явлений увеличивается, вследствие мелких глубин. Из-за того, что берег очень отмелый, волновое воздействие ослаблено.

Более сильные динамические течения и ветровое волнение характерны для северной части Тазовской губы. Высота волн в данной части губы может достигать 0,6-0,8 м [23].

Основной вклад в гидродинамический режим вносит постоянный сток вод, который направлен из губы, но также играет не мало важную роль непостоянные приливные и штормовые течения. Их соотношения между собой меняется в течение года. Постоянные течения в Тазовской губе обеспечиваются речным стоком р. Таз и Пур. Эти течения движутся на север со скоростью 0,25 – 0,45 м/с. Так как расход речного стока не постоянен от сезона к сезону, то и скорость течения уменьшается от весны к осени.

На рассматриваемой части акватории преобладают полусуточные приливы. Существенную роль в образовании рельефа дна в летний и осенний период межени играют волны и генерируемые ими течения, потому что в это время скорость речного стока не превышает 0,1-0,2 м/с. Также на волнение в данном районе влияют наличие и распределение льда и особенности батиметрии [23].

1.3. Исследуемые характеристики

Наблюдение за уровнем в Обской губе, включая Тазовскую, начались еще в 20-30-е гг. 20 века. Они велись в связи с разработкой проектов по строительству портов, а также в связи с описью и съемкой берегов. До пятидесятых годов этого же века наблюдения носили нерегулярный характер. Измерения проводились короткими сериями – 15-30 суток, иногда до 2-3 месяцев, в навигационный (летний) период – июль-сентябрь. Круглогодичные срочные и ежечасные

наблюдения за уровнем моря на полярных станциях стали измеряться в период 50-70 годов 20 века [1].

Расход воды – это некоторый объем воды, протекающий через поперечное сечение водотока за единицу времени. Единица измерения – расходная единица ($\text{м}^3/\text{с}$).

Уровень воды - высота поверхности воды, отсчитываемая относительно некоторой постоянной плоскости сравнения (по умолчанию — относительно ординара).

В период половодья весной и в период паводков осенью наблюдаются высокие значения уровня воды. Зимой и летом значения уровня уменьшаются – это называется меженью.

Половодье – период водного режима реки с максимально высокими значениями уровня воды, который повторяется в данных климатических условиях из года в год в одно и тоже время. Еще половодье называют снеготаянием или таянием ледников. В разных климатических зонах и при разных условиях половодье может быть: весенним, весенне-летним, летним. Также длительность половодья сильно варьируется от 2-3 недель до 2 месяцев.

Межень – период водного режима реки, для которого характерны продолжительные низкие значения уровня воды. В основном начало межени принимают – конец половодья. Повышения значений уровня во время осенних дождей говорит об окончании межени. Питание рек в этот период происходит за счёт грунтовых вод. Это явление характерно летом, обычно июль – август.

Паводок – период волнового режима реки, который происходит из-за дождя или снеготаяния во время оттепели. Для этого явления характерны кратковременные и нерегулярные поднятия уровня воды, также продолжительность варьируется от недели до месяца. [24].

Сгонно-нагонные явления — это такое возмущение уровня, которое происходит по метеорологическим причинам. Их величина образуется таким образом: из измеренного уровня вычитаются приливные колебания, но при том условии, что из исходных данных был удален годовой ход.

Сгон – это отрицательное возмущение уровня, а нагон, соответственно, положительное изменение уровня. Временной диапазон таких явлений составляет от нескольких часов до нескольких суток [25].

Приливы – это изменения уровня воды, которые происходят из-за гравитационного взаимодействия между Луной, Солнцем и Землей. Результирующая приливная сила – реальная гравитационная сила минус сила тяжести, также вторичный эффект силы тяжести. Известно, что на нашей планете центробежная сила постоянна, а сила тяжести – нет. Это связано, с тем, что на Земле она зависит от расстояния между двумя телами. Следовательно, можно сделать вывод, о том, что приливная сила – разница между силами (тяжести и центробежной) в каждом отдельном месте планеты Земля.

В тот момент, когда приливы заходят в устье или устьевые бассейны, граничные условия изменяются пропорционально резкости изменения геометрии водоема. Происходят значительные изменения ширины и глубины акватории – они уменьшаются, но также эти параметры могут сильно изменяться по длине бассейна. В итоге всех этих изменений приливная волна деформируется, и это в свою очередь меняет приливную амплитуду, фазовую скорость. Деформация прилива в большинстве своем зависит от взаимодействия между сужением русла и придонным трением [26]. К увеличению приливной волны и начальной фазы может приводить сужение каналов, так как энергия приливной волны проходит через более маленькую площадь, но в тоже время донное трение приводит к уменьшению амплитуды из-за потери энергии [27].

Исследованию динамики уровня Обской губы посвящено не так много работ. Еще в 1940-1941 годах В.Г. Корт [7,8], используя градиентный метод, составил прогностическое уравнение у мыса Яр-Сале Обской губы для прогнозирования уровня моря за 18 часов.

$$H_i = 0,79 * H_2 + 0,63 * \Gamma_1 + 2,058\Gamma_2 + 26,5 \quad (1.1)$$

где H_i – прогнозируемый уровень за 18 часов;

H_2 – предшествующий уровень, см;

Γ_1 – градиент давления между станциями Салехард и о. Белый, мбар;

Γ_2 –градиент давления между станциями Салехард и Усть-Енисейский порт, мбар.

Также схожее прогностическое уравнения использовал Н.А. Лабзовский, отличие в том, что в качестве предиктора он помимо атмосферного давления использовал характеристики ветра [28].

Также много изучали изменения колебания уровня Г.Н. Войнов и А.А. Пискун [1-5]. Г.Н. Войнов создал метод предвычисления приливов в Обской губе [29].

Исследованиями колебания уровня моря у мыса Каменный и возможностью его прогноза занимались Е.А. Яговкина и О.В. Хаймина [9, 10]. В своих работах они типизировали синоптические ситуации над акваторией выявляли характерные траектории движения циклонов, которые приводят к значительным и быстрым изменениям уровня моря у мыса Каменный. И с учетом этого более корректно учитывали интенсивность стонно-нагонных явлений в прогностических зависимостях.

Также А.В. Коптева провела большое исследование в области непериодических колебаний уровня и течений Обской губы и приливных колебаний уровня и течений на основе данных, полученных на полярных станциях и собранных в экспедициях. Она первая представила котидальные карты волны прилива M_2 для летнего и зимнего периода, а также установила сезонную изменчивость прилива под действием ледяного покрова. [6].

Существует множество исследований связанных с моделированием гидрологических процессов в Обской губе [16, 30]. Но именно исследований в области моделированием уровня воды в Обской губе не так много. Например, В.Ю. Чанцев и соавторы [11, 12] предложили исследовать данный район с помощью численной модели Delf3D. В качестве начальных условий динамические характеристики задавались нулевыми, а для раскачки гидродинамического режима задавались преимущественно приливо-отливные

колебания уровня. Результаты данного эксперимента подводились путем сравнения с данными наблюдений уровня моря и вертикального распределения течений, полученные с донной автоматической станции. Итог эксперимента: фаза рассчитанная совпадает с наблюдаемой, максимальная ошибка расчета уровня не превышает 30 см, средняя погрешность расчета составляла 2,4 см.

Таким образом, исследование особенностей колебания уровня в Обской губе на основе математического моделирования сохраняет свою актуальность.

2. Материалы и методы

2.1. Постановка задачи математического моделирования колебаний уровня моря в Обской губе с использованием программного комплекса CARDINAL

Динамика изменения уровня воды в акватории может изучаться с помощью программного комплекса CARDINAL, который позволяет создавать математические модели различных водных объектов и моделировать нестационарные гидродинамические процессы. В основе программы лежат решения численными конечно-разностными методами гидродинамических уравнений. В решении используются переход к криволинейным гранично-зависимым координатам. Это позволяет повысить точность решения поставленной задачи в местах (областях) с резким изменением рельефа дна и сложных форм [31].

Программный комплекс CARDINAL предназначен для моделирования стоковых, ветровых, приливных и плотностных типов течений и колебаний уровня воды. Расчет может выполняться как в плановой (двумерной), так и в трехмерной постановках. В программе используется переход к криволинейным гранично-зависимым координатам. Это позволяет достичь высокого разрешения сетки в самых важных ее частях и более точных решений. В основе решения лежит система гидродинамических уравнений. Которые решаются в модели численными конечно-разностными схемами.

В этом программном комплексе были выполнены действия для создания расчетной области. За основу была взята батиметрическая карта Обской губы, представленная на рисунке 2.1. Последовательность создания расчетной области включала:

- 1) оцифровку береговой линии исследуемой акватории, таким образом создана граница расчетной области;

2) в южной части расчетной области из нее были исключены острова дельты р. Оби для упрощения задания граничных условий;

3) размеры расчетной области задавались из расчета 191 узел с юга на север и 109 узлов с запада на восток. Для этого были выбраны контрольные точки и присвоены им номера узлов сетки. Они были выбраны и поставлены в тех местах, где происходило резкое изменение направления границы области;

4) дополнительные контрольные точки контура ставились для улучшения качества сетки, т.е. к приближению к более ортогональному виду. Было поставлено 23 точки на основной границе расчетной области и 6 на внутренней

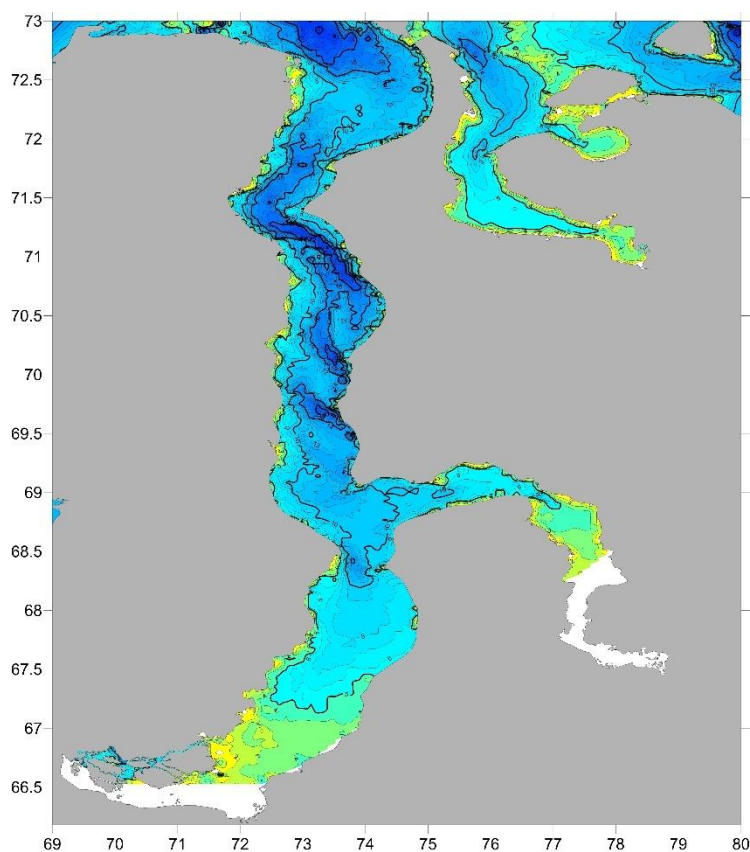


Рисунок 2.1 Батиметрическая карта Обской губы

границе (острова). После исправления всех возникших ошибок, таких как: незамкнутый контур, лишние точки или прямые, несовпадения в присвоении номеров узлов сетки и другие; была создана первая версия расчётной области (см.

приложение А, рисунок А.1), в которой существовали некоторые неточности в описании всех особенностей места и берегов;

5) однако после первых численных экспериментов было принято решение перенести границу в дельте Оби восточнее 71° для того, чтобы “избавиться” от островов, тем самым облегчив расчет, так как учесть все маленькие притоки и речки Оби очень сложно, но если ими совсем пренебрегать, то очень сильный поток воды придется на очень узкую площадь. Перенос границы восточнее группы островов дельты Оби позволил формально перенести все притоки в одну северо-западную часть и увеличить площадь сечения для более корректного задания расходов на границе;

6) далее были учтены выявленные недостатки созданной сетки, и создана основная криволинейная сетка (рисунок 2.2) на которой проводились расчеты.

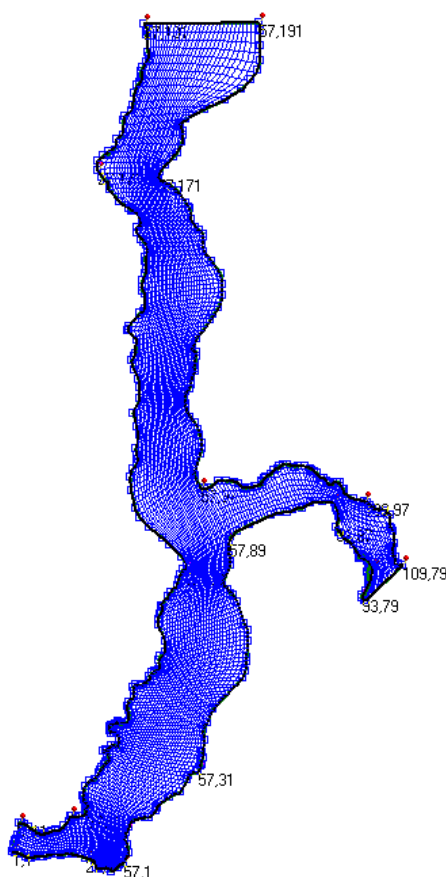


Рисунок 2.2 Расчетная область для моделирования динамики уровня вод Обской губы. Программный комплекс CARDINAL

Дальнейшие действия для создания расчетной области заключались в том, что были сняты значения изобат (рисунок 2.1) со всей акватории и затем автоматически проинтерполированы на все узлы сетки (рисунок 2.3).

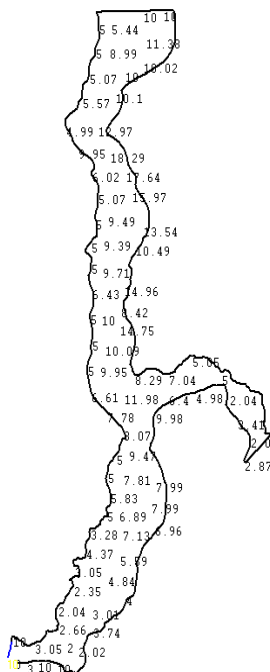


Рисунок 2.3 Глубины расчетной области для моделирования динамики уровня вод Обской губы. Программный комплекс CARDINAL

Следующим этапом были определены, где и как будут располагаться границы. На них будут заданы значения уровня числом или формулой, или расходы. Эти границы стояли на реках Обь, Таз, Надым, и еще одна граница на севере, которая учитывает изменения уровня, зависящее от Карского моря. Далее были установлены на расчетной области приборы для контроля качества расчета уровня воды с известными значениями – Антипаюта, Ныда, Сеяха, Каменный, Сабетта и у реки Чугорьяха.

Чтобы учесть колебания воды, зависящее от атмосферы, было установлено несколько метеорологических станций: Каменный, Салехард, Тазовский, Сеяха, Диксон, Попов. На них были заданы направления ветра в градусах и сила ветра в м/с с одинаковой дискретность.

2.2. Граничные условия

В ходе исследования граничные условия на жидких границах задавались двух типов: значение расходов в устьевых областях основных рек и приливные колебания на границе с Карским море.

Данные расходов воды были взяты из двух источников. Данные за длительный период в Салехарде с 1930 г по 1984 г и в Тазовском с 1965 г по 1984 г с сайта/базы данных The Global River Discharge Database [32]. Для анализа данные ряды были приведены к одной длине – с 1965 года по 1977 год. На рисунке 2.4 видно, что внутригодовые изменения среднемноголетних значений расходов для полного и укороченного рядов практически совпадают. Следовательно, при переходе к более подробному анализу данных укороченных рядов существенной погрешности в статистических оценках не будет.

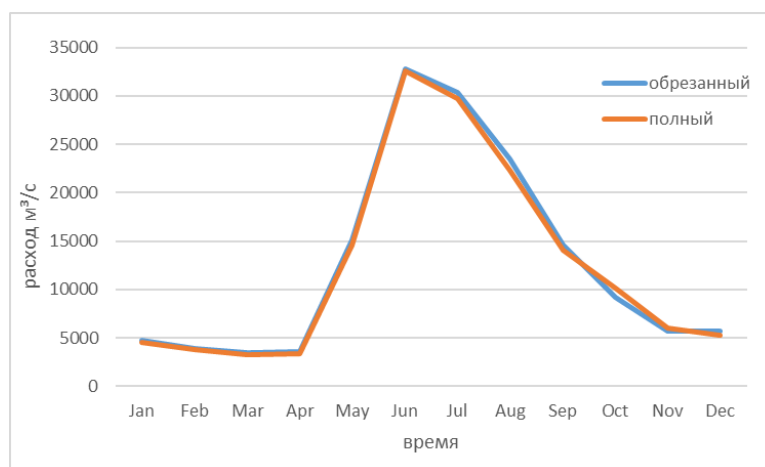


Рисунок 2.4 Среднемноголетний расход воды в Салехарде за весь имеющийся период (полный) – 1930-1984 гг. и за укороченный период – 1965-1977 гг.

На рисунке 2.5 представлены внутригодовые осредненные за 12 лет расходы р. Обь в Салехарде и р. Таз в Тазовском. Проанализировав их, можно сказать, что начало половодья в Салехарде – середина апреля, а в Тазовском –

середина мая. Также значения в Салехарде в период резкого увеличения расходов почти в 6 раз больше, чем в Тазовском.

Данные расходов за 2019 год были взяты с сайта/базы данных АИС ГМВО (Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов) [33] в 4 пунктах – Салехард, Тазовский, Надым, Пур. Как можно заметить из рисунка 2.6, значения в Салехарде значительно больше, чем в остальных пунктах. А расходы реки Пур и их колебания не очень заметны и не вносят существенный вклад по сравнению с остальными, т.е. ими можно пренебречь при задании начальных данных в модели. Максимальные расходы в Салехарде и Надыме приходятся на середину мая, а в Тазовском – на конец мая, и далее наблюдается постепенное снижение значений на всех постах.

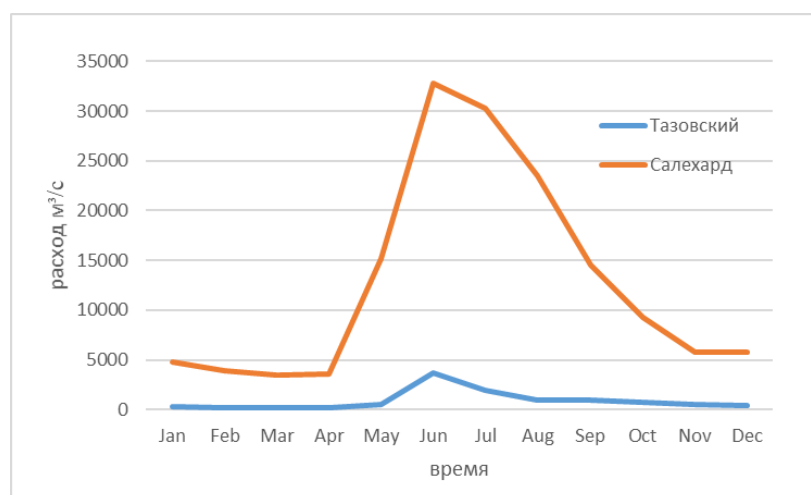


Рисунок 2.5 Среднегоголетний расход воды в Салехарде и Тазовском в период с 1965 по 1977г.

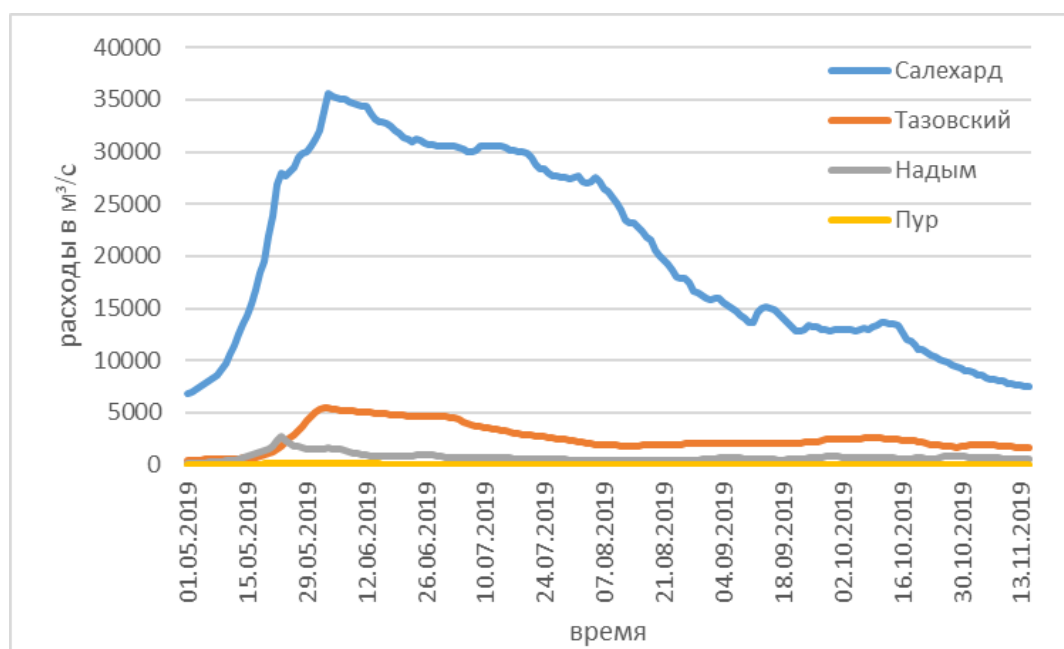


Рисунок 2.6 Расходы с 1.05.2019 по 15.11.2019 в м³/с в Салехарде, Тазовском, Надыме и Пур.

Все значения расходов на реках были пересчитаны для задания значений на входе в Обскую губу. Формула (2.1) пересчета учитывала площадь водосбора всей реки и в заданном пункте, а также значение расходов на данном гидропосте:

$$Q_P = Q_{\Pi} * \frac{F_P}{F_{\Pi}} \quad (2.1.)$$

Где, Q_p - расход реки в м³/с;

Q_{Π} – расход на гидропосте в м³/с;

F_p – площадь водосбора реки в км²;

F_{Π} – площадь водосбора гидропоста в км²;

Приливные колебания уровня на границе с морем были рассчитаны с помощью приложения Tide [34] на севере Обской губе у реки Нгояха – границе с Карским морем. Значения были получены с дискретностью 20 минут, период с мая по октябрь 2019 г.

Обобщенная информация об исходных данных представлена в таблице 1.

2.3. Метод исследования ветра

Для задания условий на границе с атмосферой использовались данные о скорости и направлении ветра из архива «Расписание погоды» [35] в пунктах Салехард, Тазовский, Сеяха, Диксон, Попов. Также предоставлены ежечасные метеорологические характеристики на мысе Каменный ООО «Арктик-Шельф Консалтинг».

Движение воздуха в горизонтальном направлении над поверхностью Земли называется скоростью ветра. Движения ветра происходит из области высокого давления в область низкого.

Существует несколько основных характеристик ветра: скорость, сила и направление. Единиц измерения скорости ветра существует несколько – метры в секунду или баллы, где один балл равен 2 м/с. Существует прямая зависимость скорости ветра от барического градиента, т.е. при увеличении барического градиента, увеличивается скорость ветра.

Таблица 1. Исходные данные

Характеристика	Период	Длина	Источник
Ход уровня г.Салехард	2018-2020	904	Сайт All.rivers
Ход уровня Тазовский	2018-2020	848	Сайт All.rivers
Метеорологические характеристики г. Салехард	2018-2020	8764	Архив данных «Расписание погоды»
Метеорологические характеристики Тазовский	2018-2020	8758	Архив данных «Расписание погоды»
Ход уровня Ныда	2019 – 2020	457	Сайт All.rivers
Ход уровня Антипаюта	2019-2020	299	Сайт All.rivers
Ход уровня Сеяха	2019	368	Сайт All.rivers
Расход воды Салехарде	1930-1984	660	Архив данных The Global River Discharge Database
Расход воды Таз	1965-1984	199	Архив данных The Global River Discharge Database
Расход воды Салехарде	2019	365	АИС ГМВО
Расход воды Тазовский	2019	365	АИС ГМВО
Расход воды Надым	2019	365	АИС ГМВО

Расход воды Пур	2019	365	АИС ГМВО
Ветер Каменный	Май- август 2019	806	ООО «Арктик Шельф Консалтинг»
Уровень Каменный	Май- октябрь 2019	4413	ООО «Арктик Шельф Консалтинг»
Метеорологические характеристики в Сеяхе	Май- октябрь 2019	1479	Архив данных «Расписание погоды»
Метеорологические характеристики в Диксоне	Май- октябрь 2019	1486	Архив данных «Расписание погоды»
Метеорологические характеристики в Попове	Май- октябрь 2019	1432	Архив данных «Расписание погоды»
Ход уровня воды в Новом порту	Май- октябрь 2019	13248	tide
Ход уровня у р. Чугорьяха	Май- октябрь 2019	13248	tide
Ход уровня Саббета	Май- октябрь 2019	13248	tide
Ход уровня у границы с морем	Май- октябрь 2019	13248	tide

Сила ветра зависит от скорости. С увеличением разности атмосферного давления между двумя участками Земли, находящимися рядом, возрастает сила ветра. Анемометр – это прибор, с помощью которого на метеостанциях измеряют скорость ветра, самопишущийся аналог называется – анемограф. Он также регистрирует направление ветра в постоянном режиме. Приборы устанавливаются на высоте 10-15 м над поверхностью, но измеренная ими характеристика называется скорость ветра у поверхности Земли.

Определение направления ветра происходит с той стороны с которого он дует, например, ветер, дующий с севера – северный или угол, образуемый с меридианом места, откуда дует ветер, т.е. его азимут.

Различают 8 основных и 8 промежуточных румбов горизонта: север, северо-восток, восток, юго-восток, юг, юго-запад, запад, северо-запад. Если направление ветра характеризуется углом его с меридианом, то начало отсчета – север и движется по часовой стрелке. Тогда, север соответствует 0° (360°), северо-восток – 45°, восток – 90°, юг – 180°, запад – 270°.

Флюгер определяет направление ветра, вращаясь по вертикальной оси. И, соответственно, под действием ветра занимает положение по направлению ветра.

Направление ветра делят на мгновенное и сглаженное, аналогично скорости. Мгновенное направление может сильно варьироваться от сглаженного или некоего среднего направления, которое в свою очередь определяется по флюгеру.

В различных местах Земли, а также в разных местах и в одно время сглаженное направление ветра различно и непрерывно меняется. В некоторых местах Земного шара за достаточно длительный промежуток времени направления ветра имеют равную повторяемость, а в других сильно заметно преобладание одного или нескольких направлений в течение всего года или же кого-либо сезона. Это зависит в большей степени от условий общей циркуляции атмосферы и в какой-то степени от местной топографии [36].

Роза ветров – это диаграмма, которая показывает, как распределена повторяемость направления ветра по основным румбам, при климатической обработке наблюдений над ветром для каждого отдельного пункта (рисунок 2.7). От начала полярных координат откладываются направления по румбам горизонта (8 или 16) отрезками, длины которых пропорциональны повторяемости ветров данного направления. Обычно, отрезки на конце соединяют линией. В начале координат, т.е. в центре диаграммы записана повторяемость штилей. Также, если учитывать среднюю скорость по каждому направлению, умножив на нее повторяемость, то получится график, который в свою очередь показывает какое количество воздуха переносится ветрами каждого направления, в условных единицах [36].

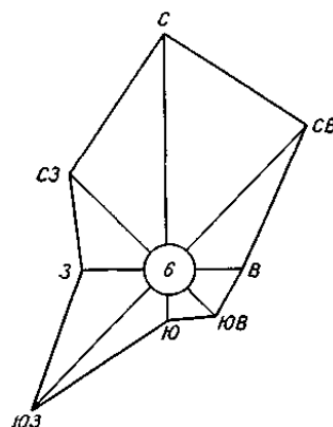


Рисунок 2.7 Роза ветров [36]

2.4. Оценка качества полученных результатов

Для оценки качества результатов использовался встроенный пакет статистики в программном комплексе CARDINAL. За основной показатель качества полученных результатов принимался коэффициент корреляции.

Существует несколько видов связи: функциональная или стохастическая (вероятностная), которые могут быть между двумя переменными.

Для оценки связи между переменными, а именно ее тесноты и направления, используют показатели корреляции. Степень тесноты линейной зависимости характеризует коэффициент корреляции r . Суть линейной зависимости двух переменных заключается в том, что когда возрастает одна переменная, то другая переменная тоже имеет тенденцию к возрастанию или убыванию по линейному закону. Если при увеличении одной характеристики другая тоже движется к возрастанию, то это прямая зависимость и тогда $r > 0$, но когда увеличивается одна величина, а другая движется к убыванию, то это обратная зависимость и $r < 0$ [37].

Для сравнения использовались:

- предвычисленные значения уровня из приложения Tide в пунктах в районе Сеяхи, Нового порта, мыса Каменный и недалеко от впадения реки Чугорьяха;

- значения уровня воды с 2018 по 2021 год в двух гидропостах: Салехард и Тазовский;
- данные уровня с 2019 по 2021 годы на двух гидропостах: Ныда и Антипаюта;
- значения уровня в 2019 году в Сеяхе.

Эти данные были обработаны с учетом нуля Балтийской системы отсчета и отклонения от среднего. Пропуски значений были ликвидированы с помощью линейной интерполяции между соседними значениями. Все данные по годам были приведены к одной длине, т.е. от условного начала половодья – май, до начала ледообразования – октябрь. Эти манипуляции необходимы для задания начальных и граничных условий в модель. Все эти значения уровня были взяты для контроля качества полученных результатов.

Для оценки чувствительности полученной модели к заданию граничных условий были предоставлены ежечасные значений уровня моря на мысе Каменный, предоставленные ООО «Арктик Шельф Консалтинг». Более подробная информация об исходных характеристиках представлена в таблице 1.

3. Результаты численных экспериментов по расчету уровня моря в Обской губе с использованием программного комплекса CARDINAL

3.1. Исследование колебаний уровня моря в Обской губе

В ходе исследований были выполнены несколько последовательных численных экспериментов, направленных на изучение влияния граничных условий на результаты расчета уровня моря. Рассмотрим их результаты.

Первый эксперимент. На границе Обь - Обская губа было задано максимальное (рисунок 3.1а) и минимальное (рисунок 3.1б) значение среднемноголетнего расхода. На границе с морем было установлено свободное протекание, в районе Тазовской губы задан уровень моря, равный 0 м.

Система установившихся стоковых течений представлена на рисунке 3.1. Так при максимальном расходе на юге расчетной области в узкой части Обской губы скорость течений составляла 30-60 см/с. В центральной части акватории (глубоководная часть) и в устьях Тазовской губы – район вблизи Антипаюты значение скорости варьировались от 6 до 30 см/с. На остальной акватории скорости не превышали 6 см/с (рисунок 3.1а).

При минимальных значениях расхода (рисунок 3.1б) на юге в узкой части Обской губы скорость течения варьировалась от 20 до 40 см/с. Двигаясь на север до Тазовской губы, скорость течений уменьшалась до 4-20 см/с. Такая же скорость наблюдалась в узких частях Тазовской губы. На остальной акватории скорости не превышали 4 см/с.

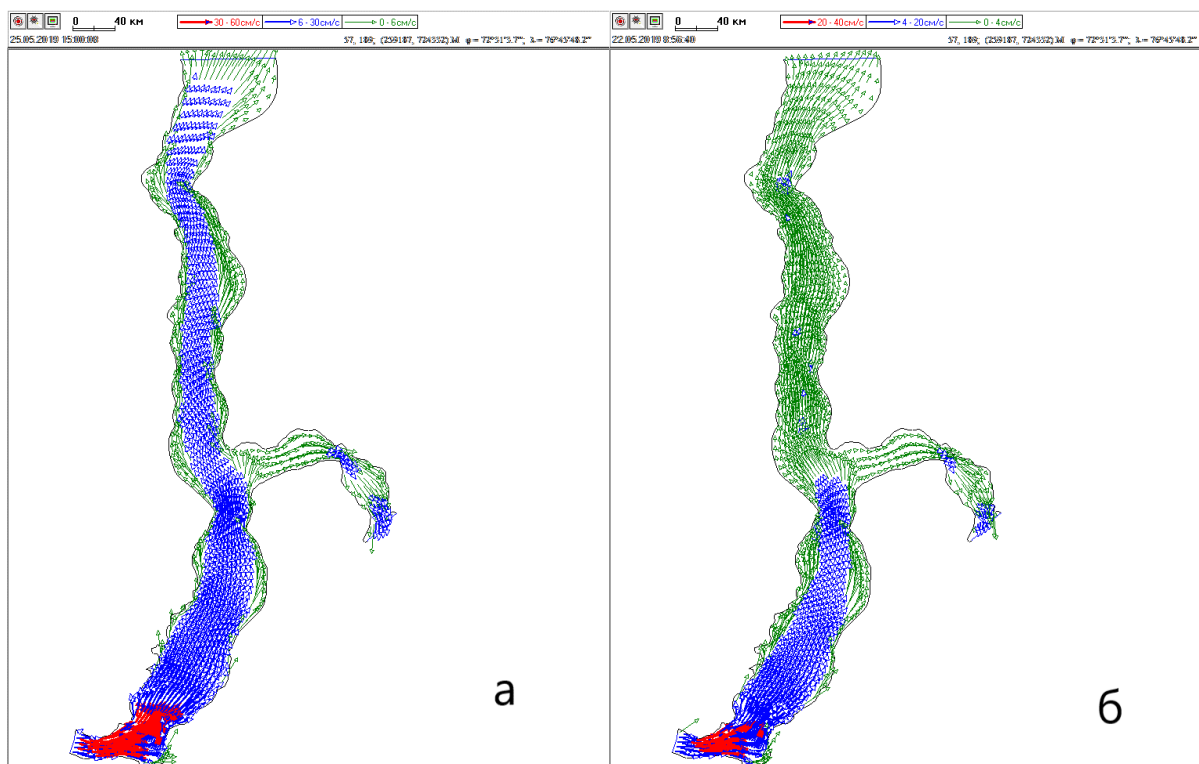


Рисунок 3.1. Результаты численного эксперимента №1: значения скоростей течений в Обской губе при максимальном (а) и при минимальном (б) расходе р.Обь. На границе с морем свободное протекание, в Тазовской губе уровень – 0 м.

На рисунке 3.2(а) можно увидеть, что начального поднятия воды при данных условиях практически достаточно. Следовательно, этот вариант расчета описывает общую тенденцию к увеличению уровня на заданном интервале.

На рисунке 3.2(б) происходит небольшое поднятие уровня. Это говорит о том, что минимальное значения расходов недостаточно для достоверного описания начального поднятия воды в рассматриваемый период.

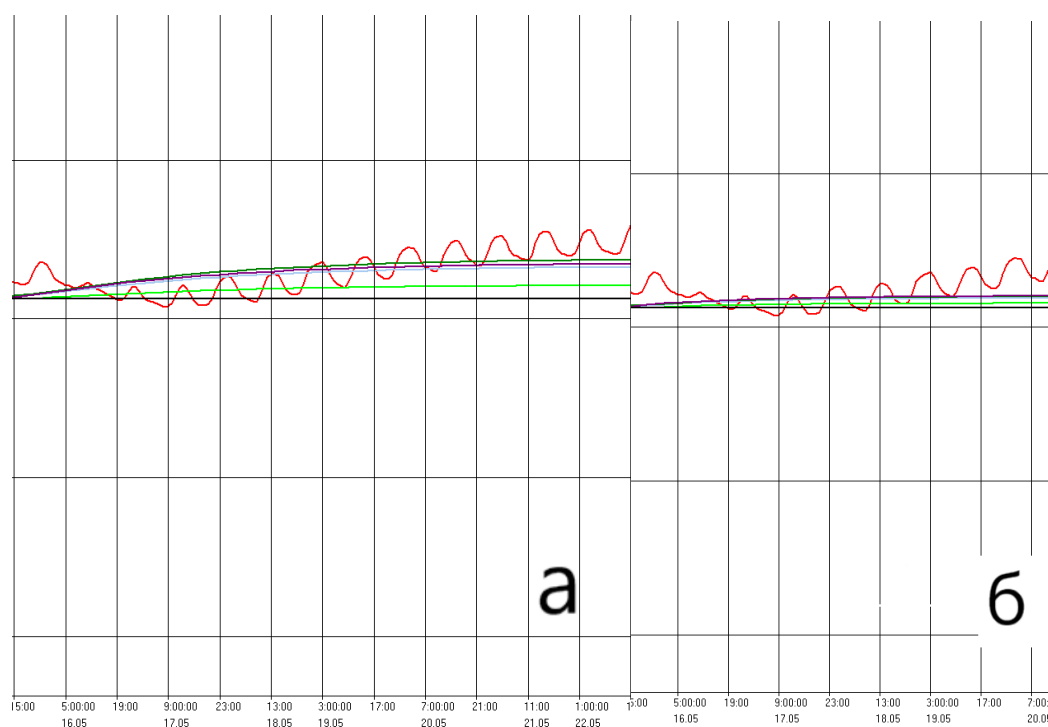


Рисунок 3.2. Результаты численного эксперимента №1: временной ход уровня в эксперименте 1: при максимальном (а) и при минимальном (б) расходе р.Обь. На границе с морем свободное протекание, в Тазовской губе уровень – 0 м: красный цвет – фактические значения на мысе Каменный, голубой – рассчитанные, светло-зеленый – рассчитанный значения у реки Чугорьяха, темно – зеленый – значения у поселка Саббета, фиолетовый – рассчитанные у Нового порта.

В т о р о й э к с п е р и м е н т . На границе Обь - Обская губа было задано максимальное и минимальное значение среднемноголетнего расхода. На границе с морем было установлено свободное протекание, в районе Тазовской губы задан уровень моря формулой, рассчитанной на основе значений приливов (для полной и малой воды).

Изменение граничных условий в Тазовской губе привело к следующим результатам:

– при максимальном расходе р. Обь (рисунок 3.3а) практически на всей акватории Обской губы значение скоростей течения находятся в диапазоне от 6

до 30 см/с. В местах задания значения расхода скорости увеличиваются до 30-60 см/с. В Тазовской губе скорости ниже и не превышают 6 см/с;

– при минимальном расходе р. Обь (рисунок 3.3б) практически на всей акватории Обской губы, кроме береговой линии и восточной части Тазовской губы скорость течения составляла от 4 до 20 см/с. На юге в узкой части Обской губы скорость увеличилась до 40 см/с. На остальной части акватории скорости не превышали 4 см/с.

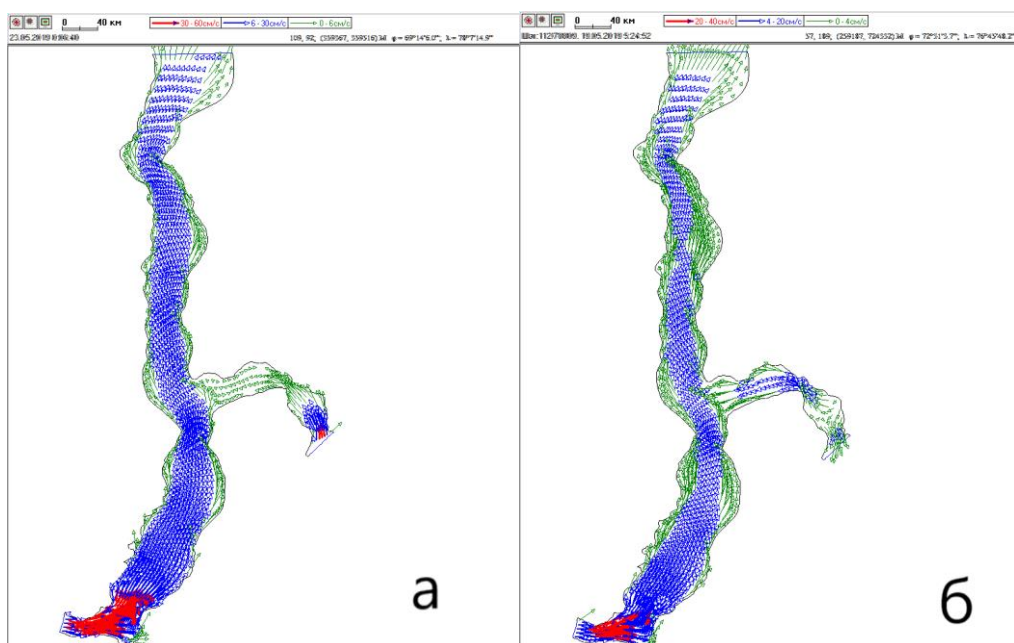


Рисунок 3.3. Результаты численного эксперимента №2: значения скоростей течений в Обской губе при максимальном (а) и при минимальном (б) расходах р.Оби. На границе с морем свободное протекание, в Тазовской губе - колебания уровня моря, заданные с помощью формулы.

При втором варианте расчета существенного изменения во временном ходе уровня в контрольных точках не было выявлено.

Т р е т и й э к с п е р и м е н т . На границе Обь - Обская губа были заданы среднемесячные расходы с мая по октябрь, осредненные за 12 лет. На границе с морем – значения уровня, рассчитанные для периода мая по октябрь

2019 года. В районе Тазовской губы был задан уровень воды формулой, как и в эксперименте 2.

Переход к заданию приливо-отливных колебаний на открытой границе с морем и учету сезонного хода расходов впадающих рек привел к следующим результатам:

– на границах, а также на юге в узкой части Обской губы скорости течения составляли 20-40 см/с. В районе мыса Каменный и в широком “кармане” в Тазовской губы скорости течений не превышали 4 см/с. На всех остальных участках губы скорость течения была от 4 до 20 см/с. Также направления течения в основном движется с юга на север, а на севере до поселка Сабетта течения движутся с севера на юг (рисунок 3.4а);

– момент малой воды: на границе Обь - Обская губа и на границе с морем скорость течения 25-50 см/с. В южной части, чуть выше Тазовской губы, а также от поселка Сабетта и до границы с морем, от места впадения Таза до Антипаюты скорость варьировалась от 5 до 25 см/с. Во всех остальных местах исследуемой территории не превышала 5 см/с. Направление движения течений преимущественно с юга на север (рисунок 3.4б).

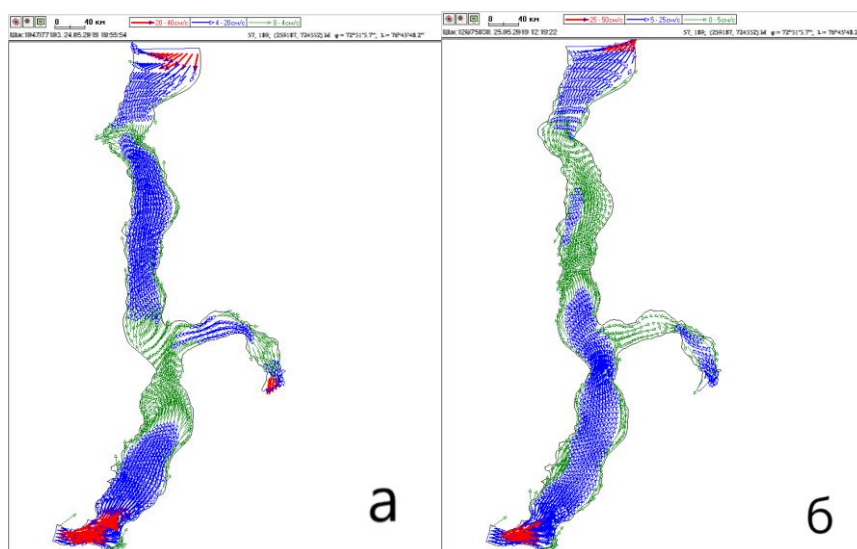


Рисунок 3.4. Результаты численного эксперимента №3: значения скоростей течений в Обской губе при среднемесячных значениях расходов в

Салехарде. На границе с морем значение уровня (а) – малой воде, (б) – полной воде, в Тазовской губе уровень моря, заданный с помощью формулы.

На рисунке 3.5 видно, что рассчитанный ряд (синий цвет) и данные в контрольных точках имеют практически одинаковую фазу, что говорит о достаточно корректном задании приливной составляющей уровня.

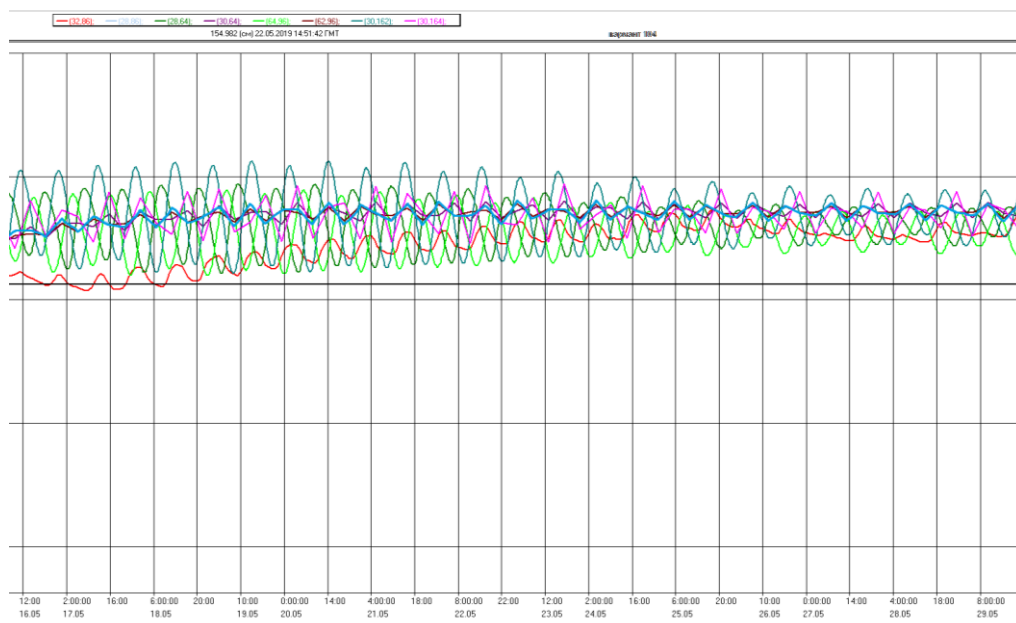


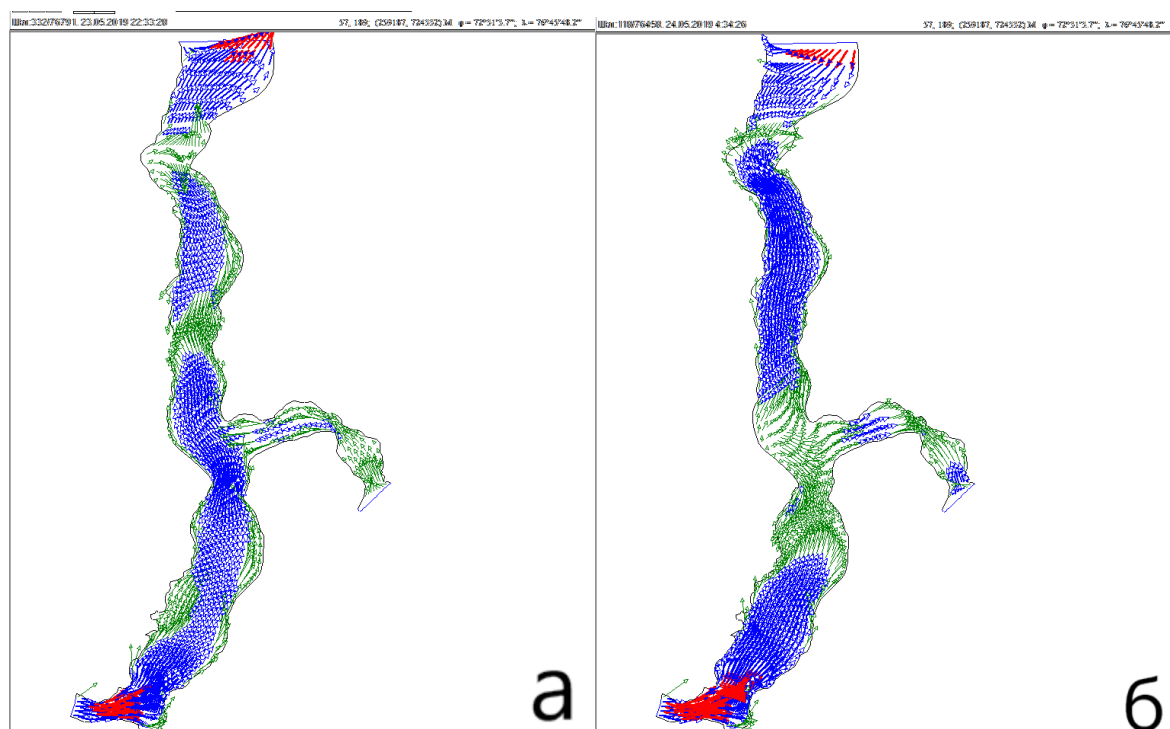
Рисунок 3.5. Результаты численного эксперимента: временной ход уровня в эксперименте №3: красный цвет – фактические значения на мысе Каменный, синий – рассчитанные, светло-зеленый – рассчитанный значения у реки Чугорьяха, темно – зеленый – значения у поселка Саббета, фиолетовый – рассчитанные у Нового порта, розовый – рассчитанные значения у поселка Сабетта.

Ч е т в е р т ы й э к с п е р и м е н т . На границе Обь - Обская губа были заданы среднемесячные расходы с мая по октябрь, осредненные за 12 лет. На границе с морем использовались значения уровня, рассчитанные в приложении Tide с мая по октябрь 2019 года. В районе Тазовской губы заданы среднемесячные расходы с мая по октябрь, осредненные за 12 лет.

Результаты 4-ого эксперимента (рисунок 3.6):

– в восточной половине границы с морем, а также на юге в узкой части Обской губы скорости течения варьируются от 25 до 50 см/с. По акватории преобладают скорости течений 5-25 см/с. Вдоль береговой линии, а также на большей части Тазовской губы скорости течений не превышают 5 см/с. Направление течений – преимущественно с юга на север. Интересные моменты встречных течений можно наблюдать при малых скоростях в районе Сеяхи;

– на севере и на юге расчетной области наблюдаются течения со скоростями 4-20 см/с, также на границе с морем и в районе границы с р. Обь скорости увеличиваются до 20-40 см/с. В центральной части Обской губы и преимущественно во всей Тазовской губе скорости не превышают 4 см/с. Направления течений имеют сложный характер, двигаясь одновременно и с юга на север и с севера на юг. Наиболее интересный момент встречных течений можно наблюдать в районе мыса Каменный (рисунок 3.6 (в)).



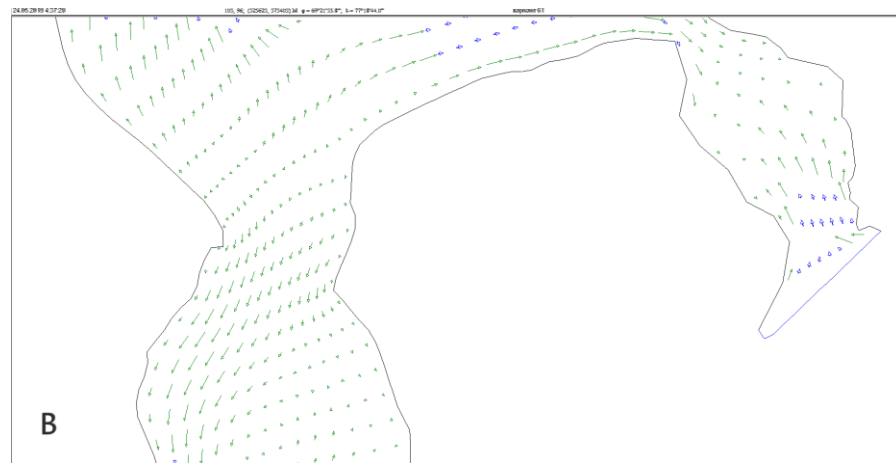


Рисунок 3.6 Результаты численного эксперимента №4: значения скоростей течений в Обской губе при среднемесячных значениях расходов в Салехарде и Тазовском. На границе с морем значение уровня (а) – полной воде, (б) – малой воде, (в) – при малой воде увеличенный результат у мыса Каменный.

П я т ы й э к с п е р и м е н т . На границе Обь - Обская губа, у рек Таз и Надым были заданы среднемесячные расходы с мая по октябрь за 2019 г. На границе с морем – значения уровня из Tide с мая по октябрь 2019 года.

На границе с морем и на границе Обь - Обская губа скорости течения составляли 25-50 см/с. В южной части до Тазовской губы, включая мыс Каменный, и в северной части от поселка Сабетта до границы с морем преобладали течения со скоростью 5-25 см/с. В остальной акватории течения не превышали 5 см/с (рисунок 3.7).

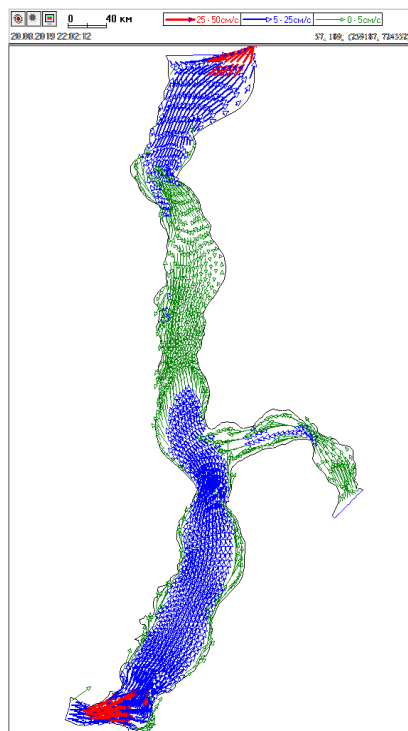


Рисунок 3.7. Результаты численного эксперимента №5: значения скоростей течения и их направления в Обской губе. На границе Обь - Обская губа, у рек Таз и Надым заданы среднемесячные расходы с мая по октябрь за 2019 г. На границе с морем – значения уровня из Tide с мая по октябрь 2019 года

На рисунке 3.8 изображен временной ход уровня воды у мыса Каменный по данным наблюдений и по результатам численного эксперимента. Можно утверждать, что рассчитанные значения описывают равномерное поднятия уровня, вызванные увеличением расходов в реках в период половодья, но при этом совершенно отсутствуют выраженные сгонно-нагонные колебания, характерные для натуральных данных. Это говорит о недостаточности задания граничных условий исключительно расходами впадающих рек и уровнем моря на открытой границе.

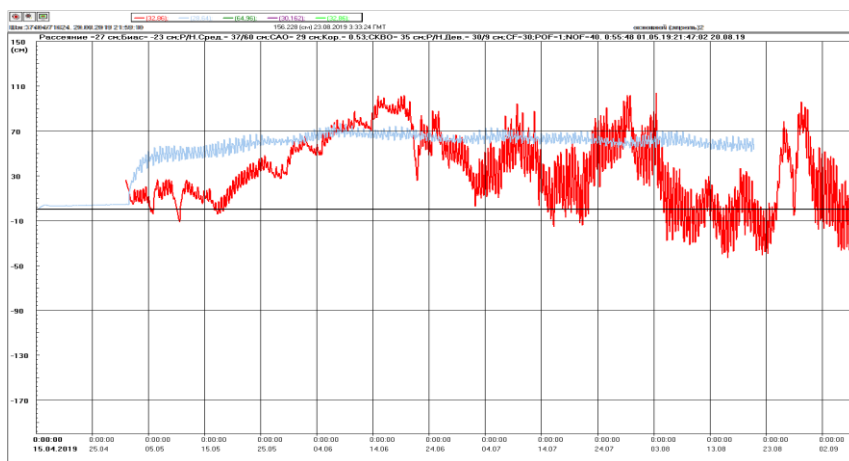


Рисунок 3.8. Временной ход уровня воды при эксперименте №5 в контрольной точке м. Каменный: голубой цвет – рассчитанные значения, красный – фактические.

Шестой эксперимент. При задании граничных условий в этом эксперименте по сравнению с экспериментом №5 были добавлены данные о силе и направлении ветра в Тазовском.

Скорости течений на рисунке 3.9 имеют максимум на юге у границы Обь - Обская губа и составляют 20-40 см/с. Почти во всей северной части залива от Тазовской губы и в южной части до, примерно, бухты Находка, значения варьируются от 4 до 20 см/с. На остальной акватории скорости не превышают 4 см/с.

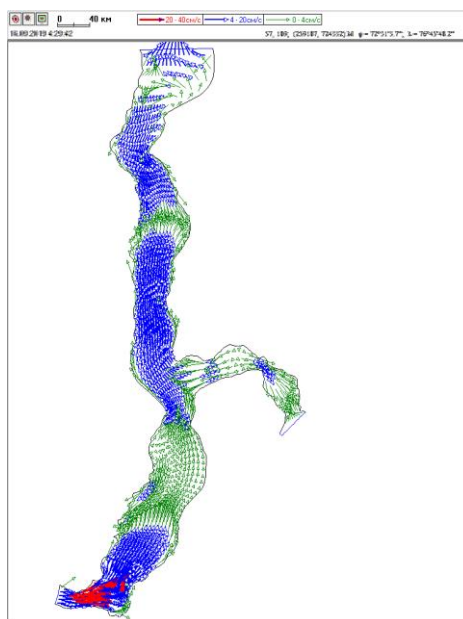


Рисунок 3.9. Направления и скорости течений при эксперименте №6

При добавлении ветра в Тазовском значительных изменений в ходе уровня не появилось (рисунок 3.10).

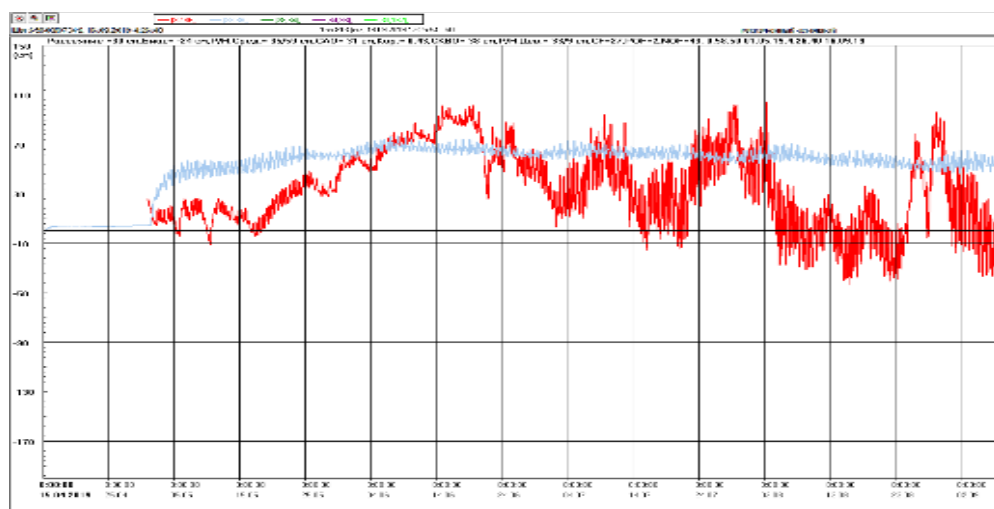


Рисунок 3.10. Временной ход уровня при эксперименте №6 в контрольной точке м. Каменный: голубой цвет – рассчитанные значения, красный – фактические.

С е д ь м о й э к с п е р и м е н т . При задании граничных условий в этом эксперименте по сравнению с экспериментом №5 были добавлены данные о силе и направлении ветра у мыса Каменный.

При добавлении ветра на мысе Каменный произошли значительные изменения во временном ходе уровня: появились сгонно-нагонные колебания. Рассчитанные значения и реальные находятся в противофазе (рисунок 3. 11), те при поднятии реального уровня, рассчитанный уменьшается и наоборот. Возможной причиной такого несоответствия полученных результатов численных экспериментов и натурных данных является рассмотрение всей толщи вод губы, как одного однородного слоя. Это не соответствует действительности. Как отмечалось ранее, Обская губа имеет достаточно выраженную вертикальную стратификацию. Поэтому при выполнении дальнейших экспериментов толща вод губы делилась на несколько слоев.

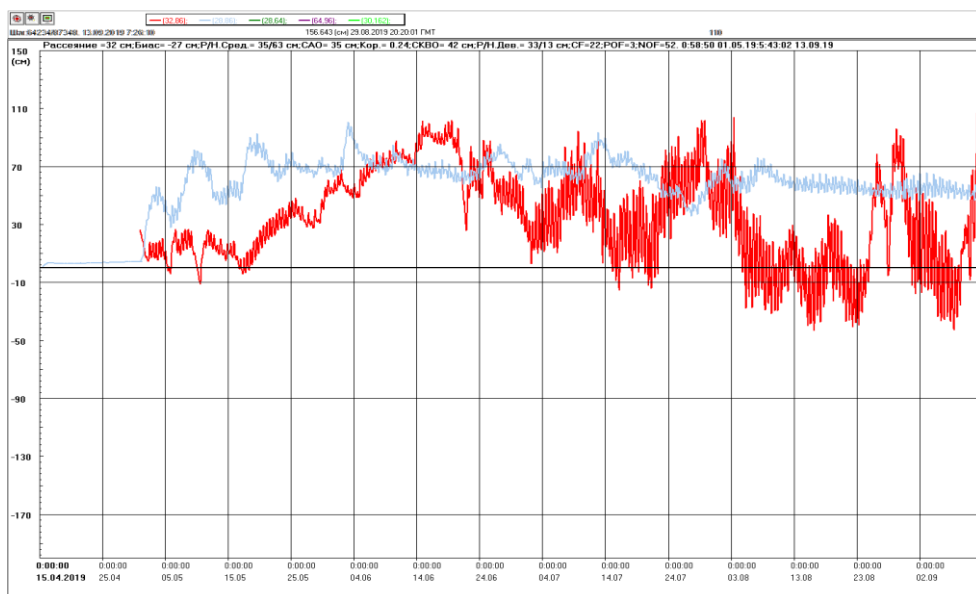


Рисунок 3.11. Временной ход уровня при эксперименте №7 в контрольной точке м. Каменный: голубой цвет – рассчитанные значения, красный – фактические.

Следующие расчеты заключались в рассмотрении случаев одновременного добавления ветра на мысе Каменном и метеостанции Тазовский, но временной ход уровня практически не изменился (см. Приложение Б, рисунок Б.1).

Далее были выполнены несколько вариантов различным количеством слоев, на которые делилась толща вод губы. Если обобщить полученные результаты, можно сделать выводы:

1. при задании нескольких слоев формируется придонное противотечение (см. Приложение Б, рисунок Б.2);
2. при увеличении количества слоев происходит возрастания скоростей течения на поверхности, например, при 4 слоях у мыса Каменный скорости находятся в диапазоне от 15 до 75 см/с, а на юге в узкой части Обской губы могут достигать 150 см/с (см. Приложение Б, рисунок Б.3);
3. при увеличении количества слоев увеличивается амплитуда сгонно-нагонных колебаний. Поднятие воды становится более резким и сильным (см. Приложение Б, рисунок Б.3).

Затем было решено провести несколько экспериментов без перерасчета расходов воды через водосбор всей рассматриваемой реки.

Восьмой эксперимент. На границе с морем были заданы приливные колебания уровня, на границе с реками Таз, Надым и Обь – расходы с мая по октябрь 2019г. Направления и скорость ветра на мысе Каменный в 2019 году.

В этом эксперименте значения и направления скоростей течения практически не отличаются от результатов эксперимента №6 (см. рисунок 3.9). Временной ход уровня при этом более точно описывает промежутки поднятия уровня, но падения уровня все также практически не описывает (рисунок 3.12). В целом рассчитанный ряд на мысе Каменный описывает основные тенденции хода уровня, но амплитуда сгонно-нагонных колебаний значительно ниже, регистрируемой по натурным данным

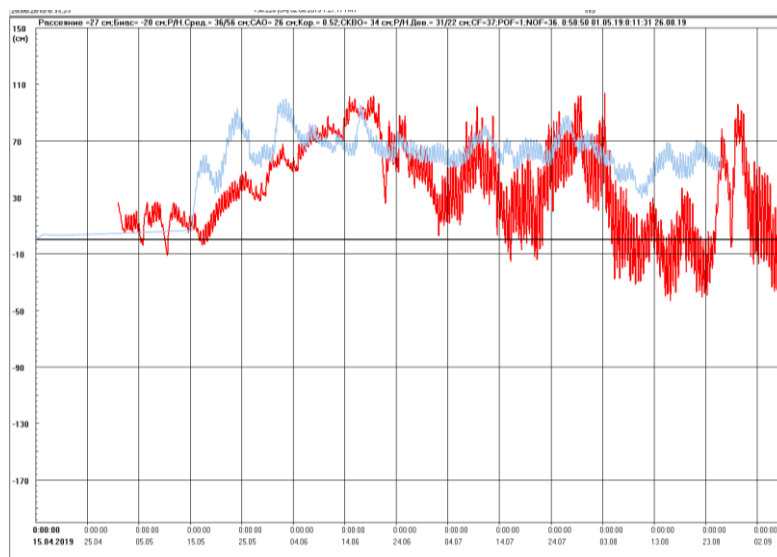


Рисунок 3.12 Временной ход уровня воды при эксперименте №8 (расчет для 1 слоя) в контрольной точке м. Каменный: голубой цвет – рассчитанные значения, красный – фактические.

Далее эти же условия были рассчитаны при разделении толщи вод на 3 слоя. И как упоминалось ранее, при увеличении количества слоев происходит более резкое и сильное поднятие уровня, но также и более резкое и сильное падение уровня. Тем самым удалось улучшить качество расчета с 26 июня по 13 августа 2019 года. Колебания рассчитанного уровня практически совпадают с реальным и хорошо описывают, как падения уровня, так и поднятия, также амплитуда колебаний увеличилась, что тоже приблизило рассчитанный уровень к реальному.

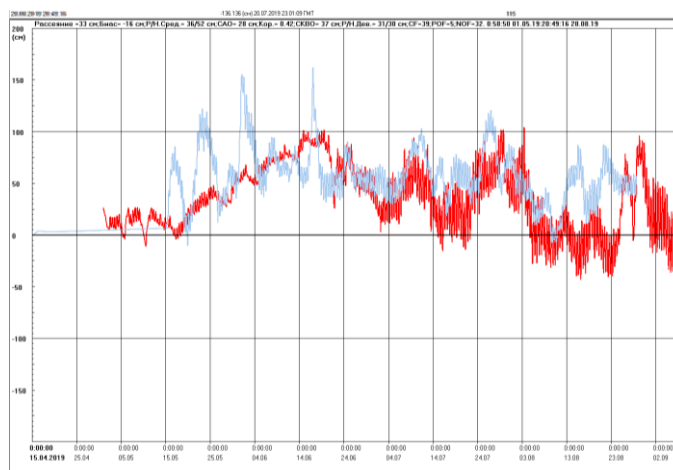


Рисунок 3.13. Временной ход уровня воды при эксперименте №8 (расчет для 3 слоев) в контрольной точке м. Каменный: голубой цвет – рассчитанные значения, красный – фактические.

После этого был рассмотрен случай задания таких же условий на жидких границах, но ветер был задан исключительно на метеостанции Сеяхи. Ход уровня был аналогичен эксперименту №6. На основе этого можно сделать вывод, что задание характеристик ветра на достаточно отдаленных пунктах от мыса Каменный недостаточно для получения корректных модельных результатов в контрольной точке.

Девятый эксперимент. Условия эксперимента были аналогичны эксперименту №8, но еще добавлены данные о скорости и направлении ветра в Сеяхе.

При одновременном добавлении данных о ветре в двух пунктах (Каменный и Сеяха), скачок в начале расчета уменьшается, тем самым улучшая качество описания реального ряда. И в целом, на всем рассчитанном промежутке поднятия уровня происходят более согласованно с данными натурных наблюдений. Описывает основные тенденции к поднятию уровню и, примерно, в тех же значениях. Но модель все также достаточно плохо описывает падения уровня.

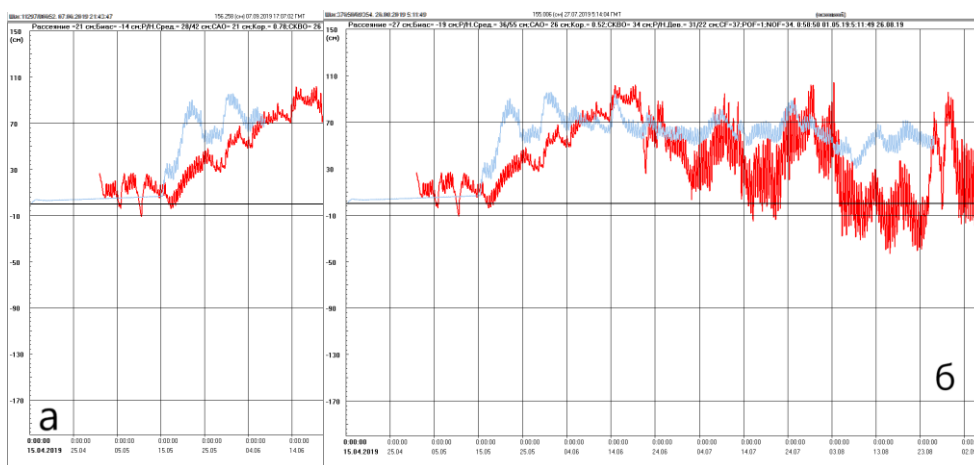


Рисунок 3.14. Временной ход уровня воды при эксперименте №9 в контрольной точке м. Каменный: голубой цвет – рассчитанные значения, красный – фактические.

Десятый эксперимент. Условия эксперимента были аналогичны эксперименту №9 и добавлен ветер на метеостанции Тазовский.

При добавлении характеристик ветра на третьей метеостанции в Тазовском, также происходит улучшение качества рассчитанного ряда, т.е. он более точно описывает основные колебания уровня. Если взять одинаковые отрезки в начале расчета (рисунок 3.14 (а) и 3.15 (а)), можно увидеть, что коэффициент корреляции приданных о ветре по двум (рисунок 3.14 (а)) составляет 0,78, а при данных с трех пунктов (рисунок 3.15 (а)) – 0,80. Но падения уровня все также описаны достаточно плохо.

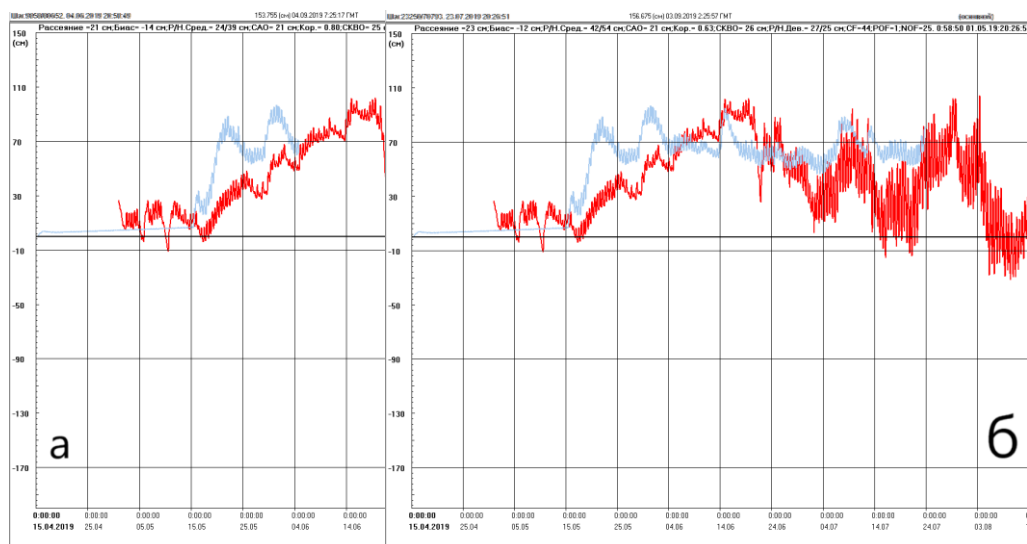


Рисунок 3.15. Временной ход уровня воды при эксперименте №10 в контрольной точке м. Каменный: голубой цвет – рассчитанные значения, красный – фактические.

Далее был произведен расчет при добавлении еще одного ряда данных о ветре в Салехарде. Это в свою очередь не дало каких-либо значительных изменений в колебании уровня.

Одиннадцатый эксперимент. Условия эксперимента были аналогичны эксперименту №10, только значение расходов в Салехарде уменьшено на 1/3 (рисунок 3.16а) и изменено граничное условие на твердой границе (эксперименты №1-10 – условие прилипания) на скольжение у берегов (рисунок 3.16б).

При уменьшении значений расхода в Салехарде втрое значения уровня у мыса Каменный в мае поднимаются выше реального, но не так сильно, как при ранее задававшихся расходах. В целом все рассчитанные значение немного снижаются. В середине июня это плохо, потому что рассчитанные значения сильно отстают от реальных, но на дальнейшем отрезке времени это отражается положительно, так как ряд практически полностью находится в диапазоне колебания реальных значений уровня.

При добавлении скольжения у берегов происходит значительное увеличение амплитуды колебания уровня, что, в свою очередь, положительно сказывается на описании исходного ряда. Это связано с тем, что пункт наблюдения находится очень близко к берегу и этот параметр играет важную роль для достоверного описания динамики изменений уровня.

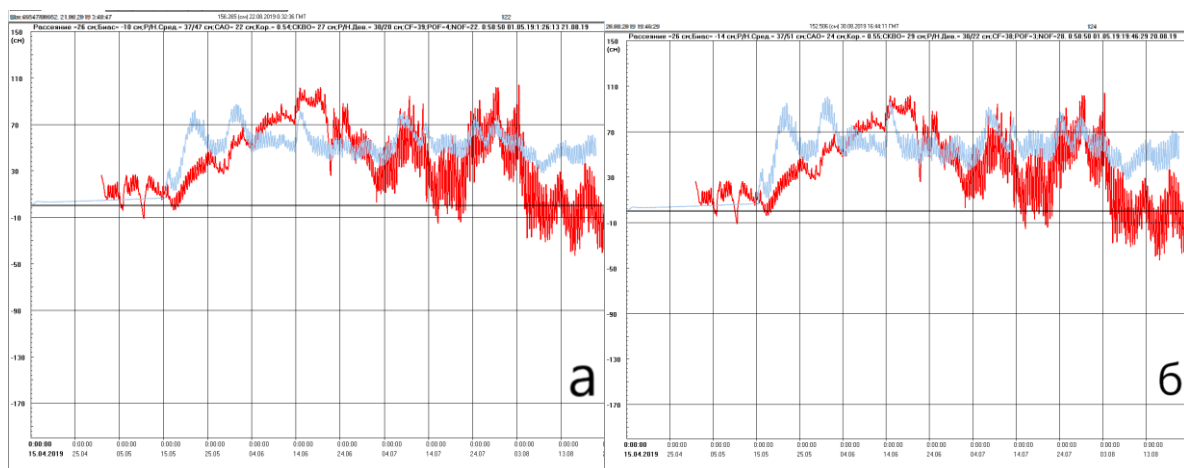


Рисунок 3.16. Временной ход уровня при эксперименте №11 в контрольной точке м. Каменный: голубой цвет – рассчитанные значения, красный – фактические.

Далее были рассмотрены те же условия, только при увеличении количества слоев. Если число слоев возрастает до 2, то амплитуда колебаний еще больше увеличивается, тем самым приближая рассчитанный ход уровня к реальному. А при дальнейшем увеличении слоев (3 и более) происходят слишком резкие и значительные поднятия уровня, и, следовательно, ухудшает качество рассчитанного ряда и уменьшает его достоверность (см. Приложение В, рисунки В.1- В.2).

Д в е н а д ц а т ы й э к с п е р и м е н т . Значения расходов были заданы аналогично эксперименту №8, также заданы характеристики ветра на метеостанциях: Каменный, Сеяха, Салехард, Тазовский, Диксон, Попов. Расчет выполнялся с учетом скольжения у берегов. Пункт проверки хода уровня на мысе

Каменный находился в обычном положении (рисунок 3.17а), а также был несколько смещен ближе к берегу (рисунок 3.17б).

При изменении положения прибора, на котором рассчитываются значения уровня на мысе Каменный значительных изменений не обнаружено.

Временной ход уровня воды при данных начальных условиях (рисунок 3.17) все так же описывает основные тенденции поднятия уровня воды. На начало исследуемого периода рассчитанный ряд имеет сопоставимые амплитуды к реальному. Но начиная с июля месяца амплитуда исходного ряда значительно возрастает, что пока не получилось описать.

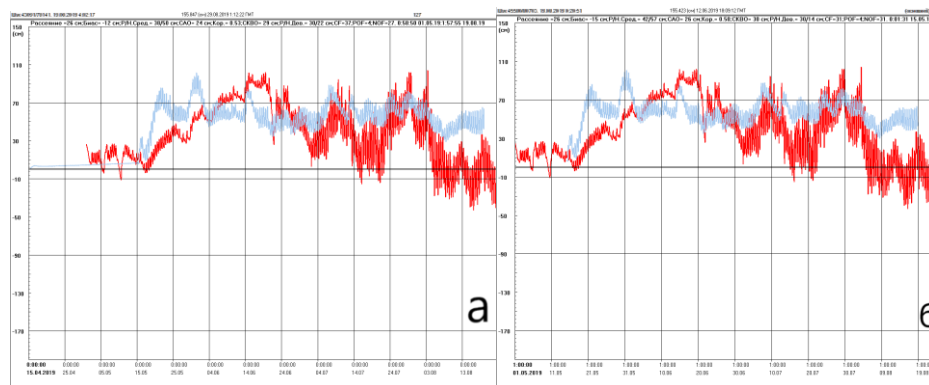


Рисунок 3.17. Временной ход уровня при эксперименте №12 в контрольной точке м. Каменный: голубой цвет – рассчитанные значения, красный – фактические.

Полученные результаты неплохо описывают поднятие уровня моря и амплитуды колебаний в первые два исследуемых месяца (май - июнь 2019 года). Значительное влияние на расчет временного хода уровня вносят характеристики ветра и расположение метеорологических станций. Также существенно влияет на результат учет вертикальной раслоенности вод залива, путем задания нескольких слоев в толще воды.

Рассчитанные ряды плохо описывают стонные колебания уровня. Можно предположить, что это связано с недостаточным учетом взаимодействия между атмосферой и водами залива, например, без учета поля давления не удастся

воспроизвести сгонно-нагонные колебания, вызванные прохождением длинной волны со стороны моря. Также кратковременные резкие падения уровня возможно связаны с затоками вод в русло рек. Такие моменты также не учитывались при расчете, т.к. задавалось постоянное поступление речных вод в залив.

В рамках данной работы были использованы не все возможности программного комплекса CARDINAL. При дальнейших исследованиях для более точного описания временного хода уровня моря в Обской губы метеорологические характеристики могут задаваться путем внесения данных о градиенте давления или с помощью задания траекторий циклонов и антициклонов над акватории. Например, в период резкого падения уровня 14.07.2019 акватория находилась под действие циклона (рисунок 3.18 (а)), что согласно исследованиям [1-10] может являться причиной сгонов (резкого и сильного падения уровня).

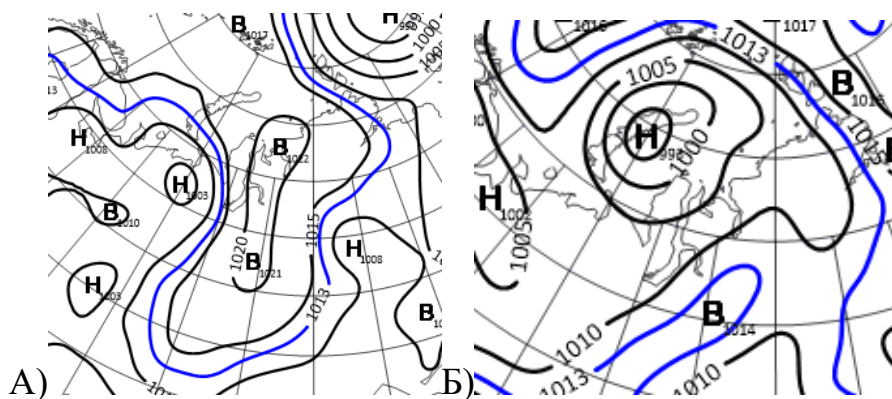


Рисунок 3.18. Фрагмент приземной метеорологической карты [39] для района Обской губы Карского моря(а) 14.07.2019 г, (б) 23.06.2019.

Схожая ситуация была и 23.06.2019 г (рисунок 3.18 (б)). К акватории подходил циклон с юго-восточной стороны и в результате этого господствовали ветры южных румбов, т.е. был сгон.

3.2. Исследование ветровой обстановки в Обской губе

Для лучшего понимания влияния ветра на колебание уровня моря в Обской губе рассмотрим повторяемость ветров в период мая по октябрь 2019 года (рисунки 3.19-3.24).

Напомню, что для Обской губы нагонными являются ветры северных румбов, а сгонными – южных.

Так в пункте Тазовский (рисунок 3.19а) наибольшее количество случаев направления ветров приходится на северное и южное направления, а наименьшее число случаев – западных и восточных направлений.

На рисунке 3.19б заметно, что сила ветра распределяется равномерно с небольшим сдвигом в сторону юго-западных направлений.

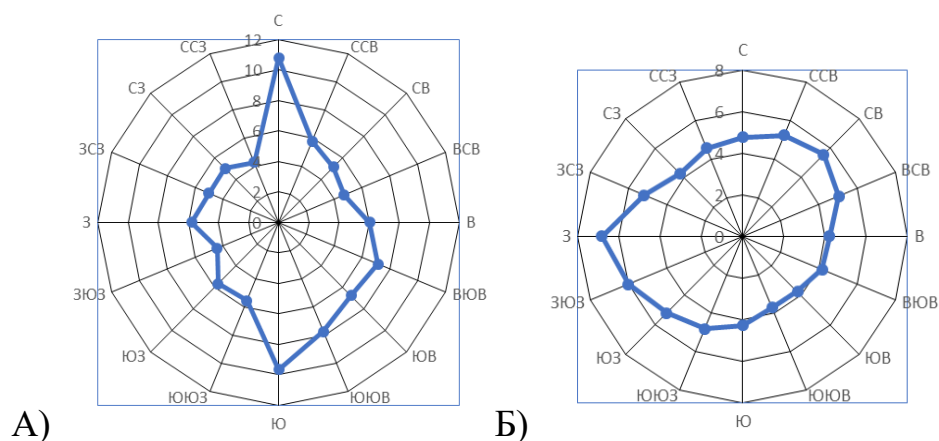


Рисунок 3.19. Роза ветров по повторяемости ветра (а) и по силе ветра в м/с (б) за промежуток времени с мая по октябрь 2019 г в Тазовском

Наиболее часто встречающийся ветер в Салехарде – это ветер северо-восточного, северо-северо-восточного, южного и западного направления (рисунок 3.20а). Северо-северо-западные и юго-восточных направлений встречаются значительно реже.

Сила ветра в Салехарде (рисунок 3.20б) максимальна при северо-восточных направлениях, а минимальна при восточном. При всех остальных направлениях скорость ветра имеет, примерно, одинаковые значения.

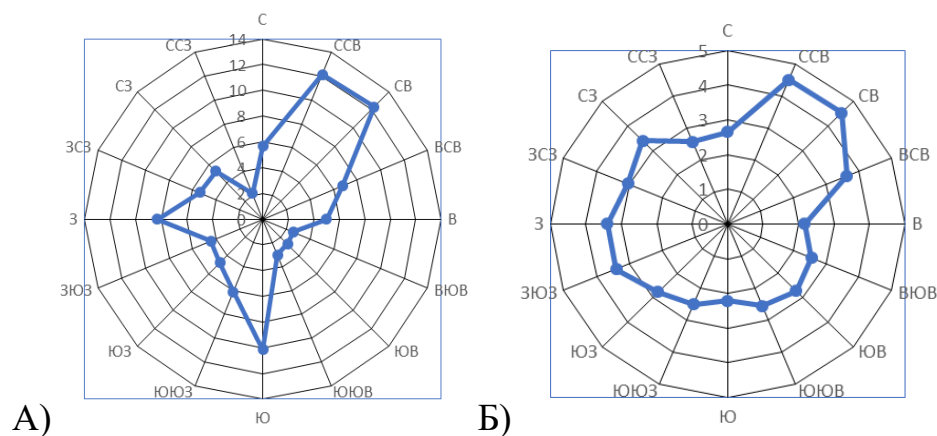


Рисунок 3.20. Роза ветров по повторяемости ветра в штуках (а) и по силе ветра в м/с(б) за промежуток времени с мая по октябрь 2019г в Салехард.

Наиболее часто встречающиеся направления ветра на мысе Каменном (рисунок 3.21а) – это северное, северо-северо-восточное и юго-юго-восточное, а реже всего встречаются направления от юго-западного до северного.

Скорость ветра на мысе Каменном (рисунок 3.21б) распределена равномерно, за исключением юго-западного направления – там значительно слабее, а в северном и восточном-юго-восточном- сильнее.

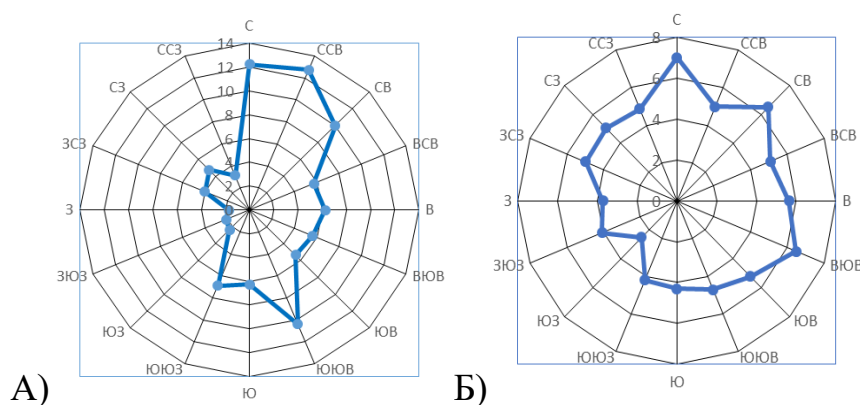


Рисунок 3.21. Роза ветров по повторяемости ветра в штуках (а) и по силе ветра в м/с(б) за промежуток времени с мая по август 2019г на м. Каменном.

Реже всего встречающиеся направления ветра в Сеяхе (рисунок 3.22а0 – северное, западное-северо-западное. Чаще всего встречается северо-северо-восточное и южное направления.

Скорость ветра в Сеяхе (рисунок 3.22б) в правой части розы ветров больше, чем в левой. Минимальные значения при южных, западных-юго-западных и западно-северо-западных направлениях, а максимальные при ветре северо-северо-восточного направления.

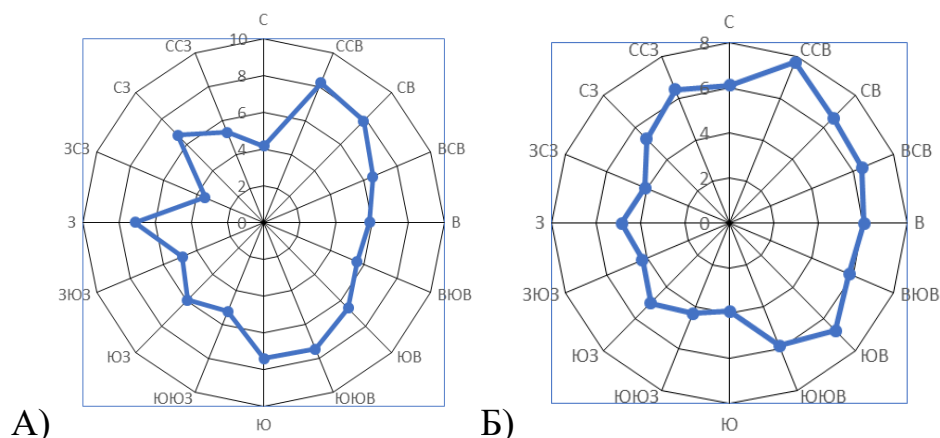


Рисунок 3.22. Роза ветров по повторяемости ветра в штуках (а) и по силе ветра в м/с(б) за промежуток времени с мая по октябрь 2019г в Сеяхе.

Чаще встречающиеся направления ветра в Попове (рисунок 3.23а) – северо-восточное, восточное-северо-восточное и восточное, а реже всего встречающиеся – западное-северо-западное и северо-западное.

Скорость ветра в Попове (рисунок 3.23б) распределена практически равномерно. Роза ветров немного сплюснута, т.е. значения немного меньше с правой и левой стороны, чем на севере и на юге.

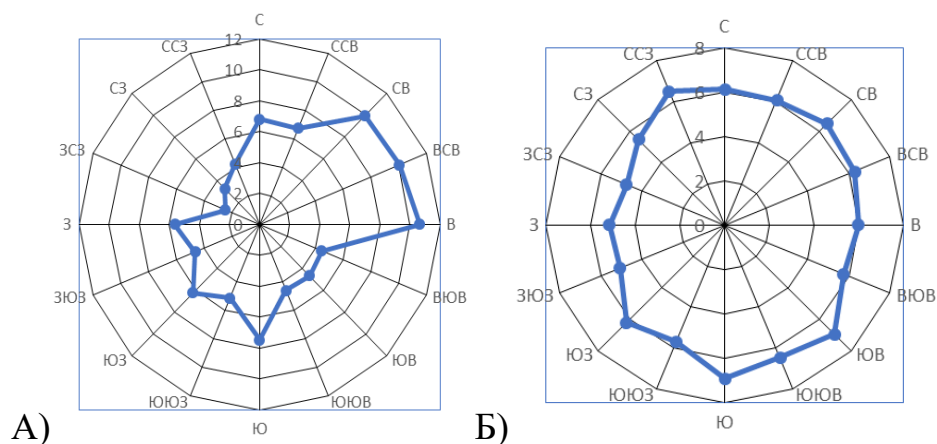


Рисунок 3.23. Роза ветров по повторяемости ветра в штуках (а) и по силе ветра в м/с(б) за промежуток времени с мая по октябрь 2019г в Попове.

Чаще всего встречающиеся направления ветра в Диксоне (рисунок 3.24 а) – северо-северо-восточное, северо-восточное и южное. Северное направление тоже встречается не редко. Остальные направления встречаются редко.

Скорость ветра (рисунок 3.24б) максимальна в тех же направлениях, которые чаще всего встречаются.

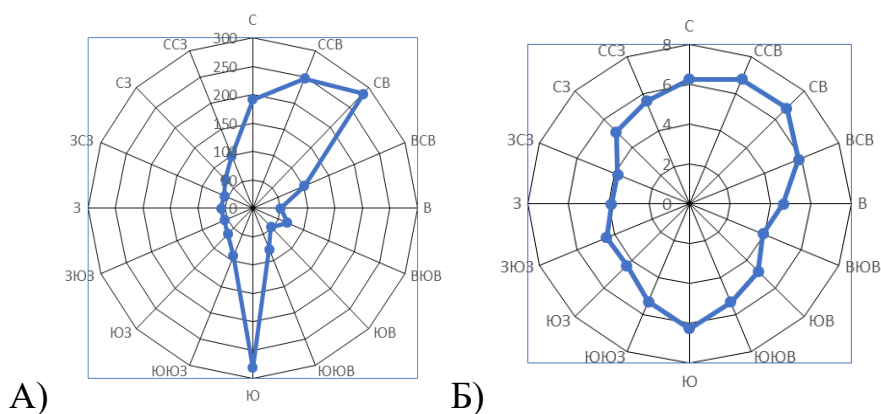


Рисунок 3. 24. Роза ветров по повторяемости ветра в штуках (а) и по силе ветра в м/с(б) за промежуток времени с мая по октябрь 2019г в Диксоне.

Таким образом, в основном на всех метеостанциях в рассматриваемый период, преобладали ветра северных румбов, реже южных. Это говорит о том, что преимущественно ситуация на акватории была нагонная, реже сгонная. В

таком случае для дальнейшего усовершенствования модели целесообразно учесть поле давления над всей акваторией обской губы и прилегающей частью Карского моря. Это позволит воспроизвести условия прохождения по заливу длинной нагонной волны

Заключение

В выпускной квалификационной работе исследовалась изменчивость колебаний уровня моря Обской губы путем математического моделирования с использованием программного комплекса CARDINAL.

В ходе работы было составлено физико-географическое описание района исследования, подготовлен и проанализирован обширный массив данных о расходах рек, впадающих в Обскую губу, скорости и направлении ветра на прилегающей территории. Выполнен расчет приливо-отливных колебаний уровня моря на входе в Обскую губу с помощью приложения Tide.

Для исследования колебаний уровня Обской губы была создана расчетная область и подготовлены массивы граничных условий. Это позволило провести серию численных экспериментов по расчету гидродинамических условий в заливе на примере 2019 года.

Полученные результаты неплохо описывают поднятие уровня моря и амплитуды колебаний в первые два исследуемых месяца (май - июнь 2019 года). Значительное влияние на расчет временного хода уровня вносят характеристики ветра и расположение метеорологических станций. Также существенно влияет на результат учет вертикальной раслоенности вод залива, путем задания нескольких слоев в толще воды.

Рассчитанные ряды плохо описывают сгонные колебания уровня. Можно предположить, что это связано с недостаточным учетом взаимодействия между атмосферой и водами залива, например, без учета поля давления не удастся воспроизвести сгонно-нагонные колебания, вызванные прохождением длинной волны со стороны моря.

В рамках данной работы были использованы не все возможности программного комплекса CARDINAL. При дальнейших исследованиях для более точного воспроизведения временного хода уровня моря в Обской губе метеорологические характеристики будут задаваться путем внесения данных о

градиенте давления и с помощью задания траекторий циклонов и антициклонов над акваторией.

Список литературы

1. Войнов Г.Н. Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура волн)/ Г.Н. Войнов, Ю.В. Налимов, А.А. Пискун, В.В. Становой, Г.Е. Усанкина [Текст]. - СПб., 2017.– 192 с.
2. Войнов Г.Н., Пискун А.А. Приливные и сгонно-нагонные колебания уровня у мыса Ям-Сале (Обская губа) // Проблемы Арктики и Антарктики – 2016. - № 4 (110);
3. Войнов Г.Н., Пискун А.А. Оценка приливов в Новом порту (Обская губа) по наблюдениям за уровнем за период 1977 – 2012 гг // Проблемы Арктики и Антарктики – 2015.- № 3 (105);
4. Пискун А.А., Войнов Г.Н. Сгонно-нагонные колебания уровня воды в Новом Порту (Обская губа) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. Вып. 1. С. 20–37.
5. Войнов Г.Н., Пискун А.А. Приливные и сгонно-нагонные колебания уровня воды в районе м. Каменный (Обская губа) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 65. Вып. 1. С. 15-33.
6. Коптева А. В. Уровень и течения Обской губы / А. В. Коптева. // Вопросы гидрологии Арктических морей. – 1953. – Т. 59.
7. Корт В.Г. К вопросу о колебаниях уровенной поверхности Обской губы // Тр. АНИИ. 1949. Т. 13. С. 100–118.
8. Корт В.Г. Непериодические колебания уровня в Арктических морях и способы их прогноза / В.Г. Корт под общей редакцией Т.П. Марютина. – Ленинград, Москва: Главсевморпути, 1941.
9. Яговкина Е.А, Хаймина О.В. Непериодические колебания уровня моря у мыса Каменный (Обская губа Карского моря). Закономерности изменчивости и возможности прогноза // Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» – 2019.

10. Яговкина Е.А, Хаймина О.В. Разработка метода оперативного прогноза непериодических колебаний уровня моря у мыса Каменный (Обская губа Карского моря) // труды конференции Maresedu– 2018.
11. Чанцев В.Ю. Численное моделирование режима Обской губы с высоким пространственным разрешением / В.Ю. Чанцев, Ю.П. Гудошников, А.А. Скутин, Д.А. Плешанов // Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» – 2019.
12. Чанцев В.Ю., Даншина А.В. Расчет внутригодовой динамики гидрофизического режима Обской губы с высоким пространственным разрешением // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т.12, № 3. С. 55-64.
13. Гидрологический режим Карского моря [Электронный ресурс]. - URL: www.aari.ru/resources/a0013_17/kara/Atlas_Kara_Sea_Winter/text/rejim. - дата обращения: (3.05.2022).
14. Крыленко М.В., Крыленко В.В. Моря арктического бассейна Т.4.
15. Попов П.А. Адаптация гидробионтов к условиям обитания в водоемах субарктики – на примере экологии рыбы в водоемах субарктики Западной Сибири. Учебное пособие, - Новосибирск, 2012.
16. Дианский Н. А. Оценка влияния подходного канала к порту Сабетта на изменение гидрологических условий Обской губы с помощью численного моделирования / Н. А. Дианский, и др. // Арктика: экология и экономика. – 2015. – 3. – С. 18-29.
17. Федоров М.К. Гидрометеорологический режим Обской губы и дельты р. Оби/ М.К. Федоров. - дис.: Ленинград, 1948.
18. Бабкин В.И. Речной сток и циклоническая деятельность в бассейнах Оби, Енисея и Лены. - М.: Научный мир, - 2017. – С. 87-98
19. Васильев, А. Н. Взаимодействие речных и морских вод в Обской устьевой области / А. Н. Васильев. // Труды ААНИИ, – 1976. –Т. 314. – С. 183-196.

20. Лисицын, А. П. Маргинальный фильтр океанов / А. П. Лисицын. // Океанология. – 1994. – Т. 34.- 5. – С. 735-747.
21. Лупачев, Ю. В. Динамическое взаимодействие морских и речных вод в приливных устьях рек / Ю. В. Лупачев. // Тр. ГОИН. -1984.- Вып. 172.- С. 64-82.
22. Прохоров А.Д. Гидрологическая оценка состояния Обской губы для транспортировки сжиженного газа из порта Сабетта в Карское море. Дипломный проект. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_d67af9c38ef04e3ebf025f2393f60cca.pdf (дата обращения: 21.04.2022).
23. Усенков С.М., Позднышев С.П., Смирнов И.П. Седиментологические и геоэкологические особенности южной части Тазовской губы // Вестник СПбГУ. - 2015. - №3. - С. 36-47.
24. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам // О. Н. Потапова- изд. Гидрометео: Ленинград – 1978. вып. 6, ч. 1
25. Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод, 1988
26. Карл Т. Фридрихс. Баротропные приливы в канальных устьях / Т. Фридрихс Карл, Валле-Левинсон Арнольдо // Contemporary Issues in Estuarine Physics, Cambridge: Cambridge University Press, - 210 С. 27–61
27. Карл Т. Фридрихс. Приливное распределение в сильно сходящихся каналах/ Т. Фридрихс Карл, Дэвид Дж. Обри // Журнал геофизических исследований: океаны – 1994. – вып. С2
28. Лабзовский Н.А. Непериодические колебания уровня в Обской губе. Л.: АНИИ, 1948. 30 с
29. Войнов Г.Н. Приливы в юго-западной части Карского моря. Результаты применения способа калибровки приливов / Г.Н. Войнов, А.К. Наумов//Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. С. 98-115.
30. Архипов Б.В. Математическое моделирование влияния судоходного морского канала в северной части Обской губы на гидродинамический и термохалинный режим Обской губы// научно-технический отчет – 2015.

31. CARDINAL. Руководство пользователя [Текст]. – URL: <https://docplayer.com/36207733-Cardinal-rukovodstvo-polzovatelya.html> (дата обращения: 17.02.2022).
32. The Global River Discharge Database. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rivdis.sr.unh.edu/> (Дата обращения: 10.05.2022).
33. Сайт федерального агентства водных ресурсов. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. [Электронный ресурс]. – URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=296> (Дата обращения: 10.05.2022).
34. WXTide32. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.wxtide32.com/> (Дата обращение: 1.05.2022)
35. Расписание погоды. [Электронный ресурс]. – URL: <https://rp5.ru/> (Дата обращения: 1.05.2022)
36. Сидорова Л.П. МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ Часть 1. Метеорология. ЕКБ: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2015.-83-88 стр.
37. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». – СПб, изд. РГГМУ, 2017.
38. Уровень воды онлайн [Электронный ресурс]. – URL: ALLRivers // <https://allrivers.info/> (дата обращения: 10.02.2022).
39. Сайт ААНИИ. Метеорологические карты. [Электронный ресурс]. – URL: http://old.aari.ru/odata/_d0010.php?mod=0&p=undefined&d=1&y=2019 (Дата обращения: 10.06.2022).

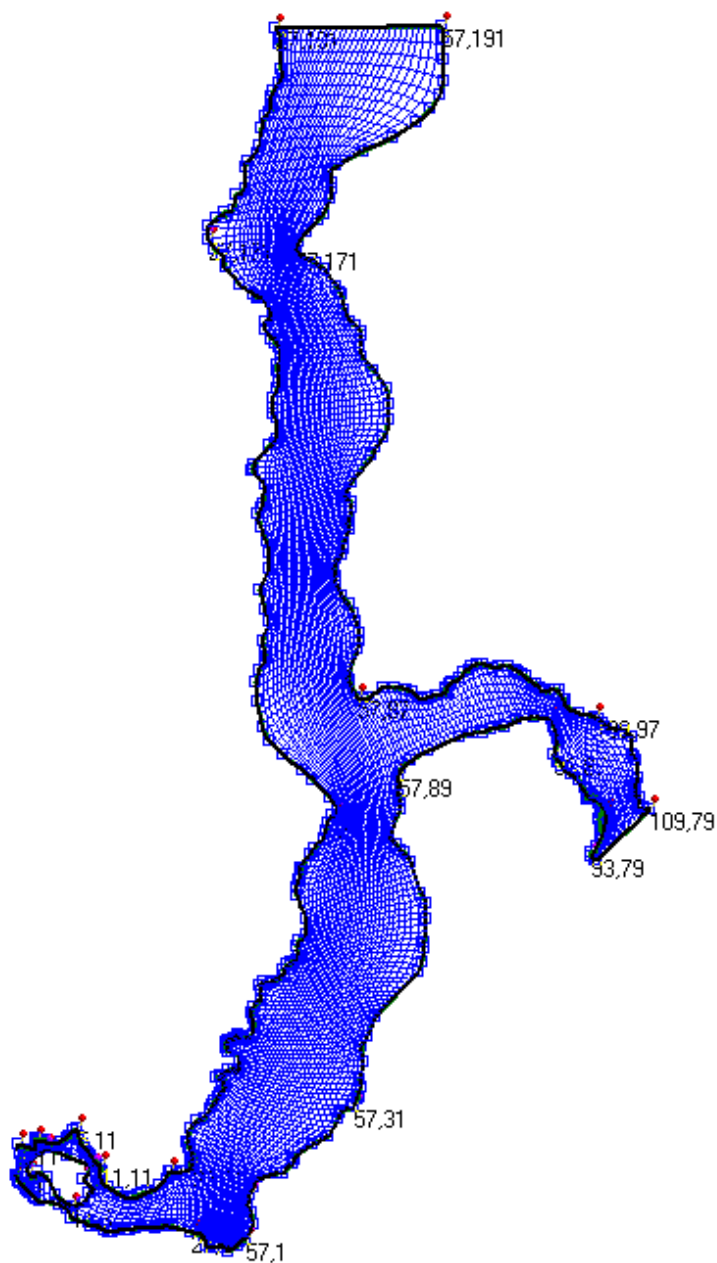


Рисунок А.1 Расчетная область для моделирования динамики уровня вод Обской губы (исходный вариант). Программный комплекс CARDINAL

Приложение Б Результаты численного эксперимента №7

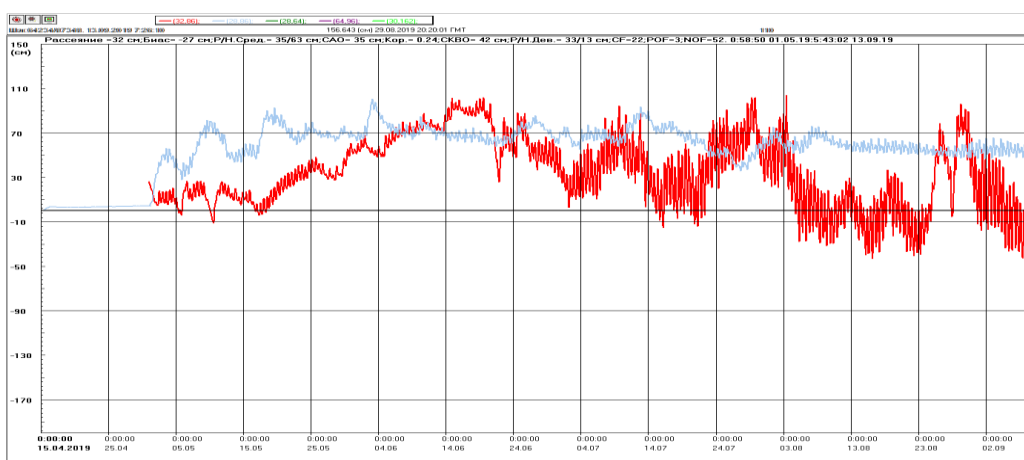


Рисунок Б.1 Результаты численного эксперимента №7: временной ход уровня в контрольной точке м. Каменный при задании среднемесячных расходов с мая по октябрь 2019 года на реках Таз, Обь, Надым, данных о ветре на Тазовском и приливных колебаний уровня на границе с морем: голубой цвет – рассчитанные значения, красный – фактические.

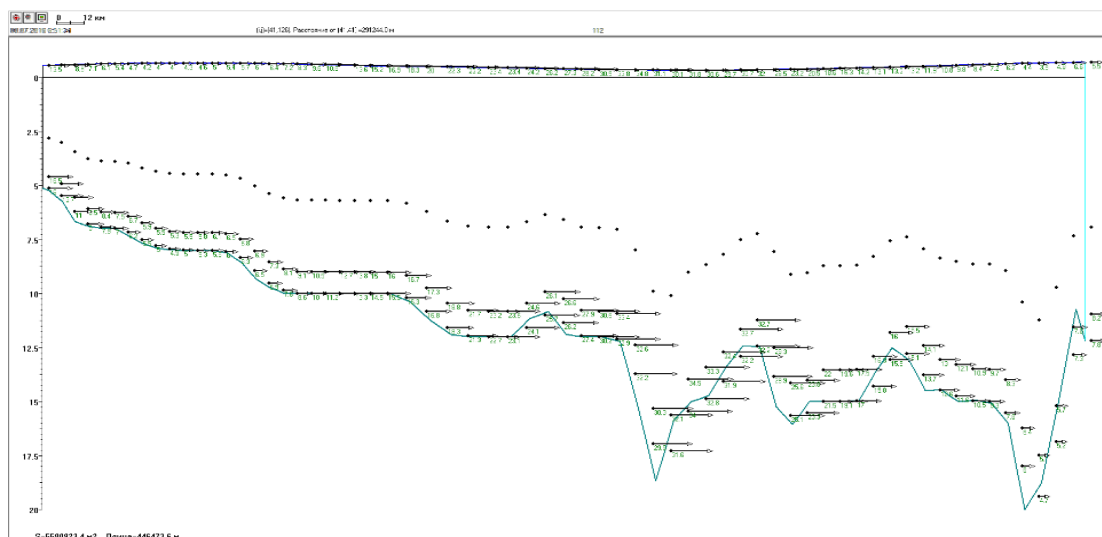


Рисунок Б.2 Вертикальный разрез вдоль оси Обской губы с юга на север: значения скоростей течения при учете 4 слоев толщи вод при эксперименте №7

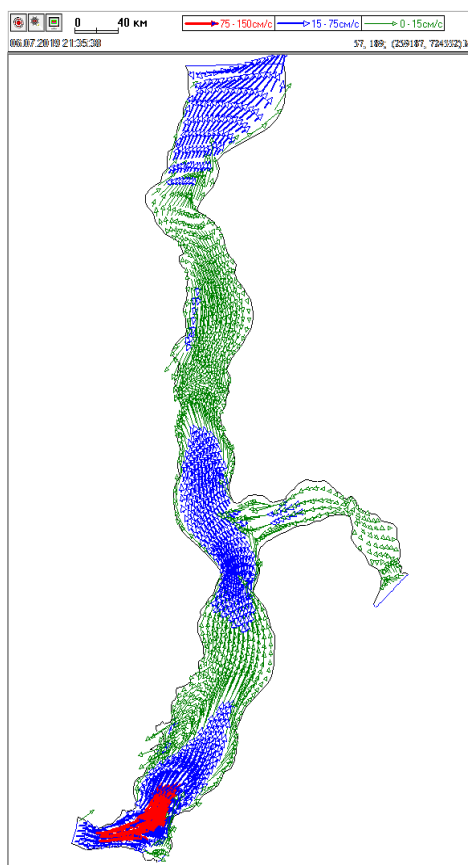


Рисунок Б.3 Значение скоростей течений при эксперименте №7 для 3 слоев

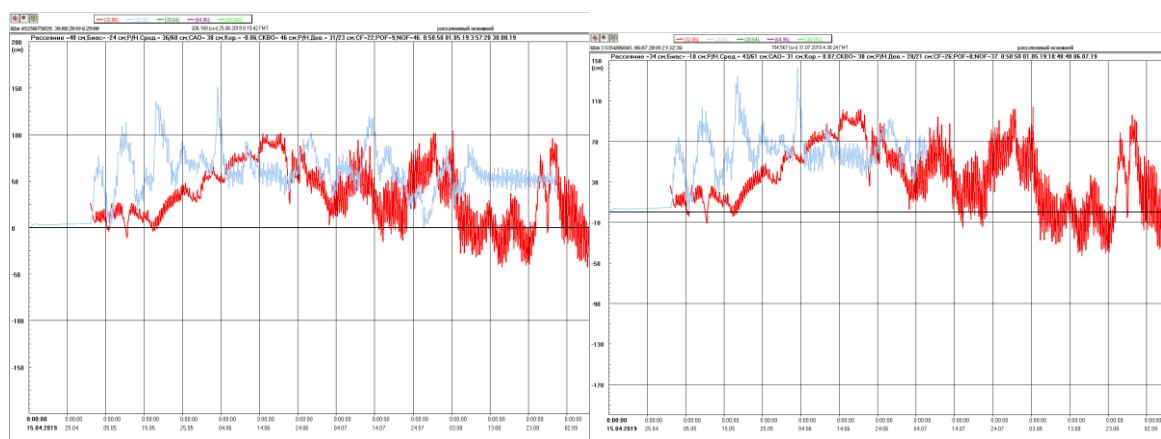


Рисунок Б.4 Результаты численного эксперимента №7: временной ход уровня в контрольной точке у м. Каменный при задании среднемесячных расходов с мая по октябрь на реках Таз, Обь, Надым. Метеостанция на Тазовском. Значения уровня на границе с морем: (а) при 3 слоях, (б) при 4 слоях

