



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра промысловой океанологии и охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалавра)

На тему Исследование динамики вод Байдарацкой губы Карского моря на
основе математического моделирования

Исполнитель Филимонова Елизавета Игоревна
(фамилия, имя, отчество)

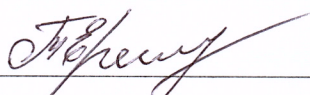
Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой


(подпись)

канд. физ.-мат. наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Ерёмина Татьяна Рэмовна

(фамилия, имя, отчество)

«19» июля 2017г.

Санкт-Петербург

2017



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра промышленной океанологии и охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему Математическое моделирование динамики вод Байдарацкой губы
Карского моря

Исполнитель Филимонова Елизавета Игоревна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____
(подпись)

канд. физ.-мат. наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Ерёмина Татьяна Рэмовна
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт-Петербург

2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Введение	3
1 Байдарацкая губа Карского моря: физико-географическая характеристика и современное использование	6
1.1 Физико – географическое описание	6
1.2 Основные климатообразующие факторы и гидрологический режим залива	7
1.3 Современное использование акватории Байдарацкой губы и прилегающих территорий	16
2 Математическое моделирование динамики вод и переноса примеси в Байдарацкой губе Карского моря	22
2.1 Постановка задачи	22
2.2 Расчетная область и задание граничных условий	26
3 Результаты математического моделирования динамики вод и переноса примеси в акватории Байдарацкой губы	28
3.1 Динамика вод залива в период август-сентябрь 2009 года по результатам математического моделирования	28
3.2 Динамика взвесей залива в период август-сентябрь 2009 года по результатам математического моделирования	33
Заключение	37
Список использованных источников	39

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире большую роль играют процессы различного моделирования. Моделируют процессы, происходящие в атмосфере, океане, создаются модели различных предметов дабы отразить какую-то грань объекта для дальнейшей работы с ним. Модели объектов обуславливают понимание и познание окружающего мира. Другими словами, модель необходима для того:

- чтобы понять структуру, свойства и законы развития некоего процесса;
- чтобы научиться управлять объектом или процессом;
- чтобы иметь возможность прогнозировать дальнейшее развитие объекта или процесса.

Также следует отметить, что «голубое топливо» на мировой арене играет очень большую роль. Актуальность добычи нефти со дна океана возрастает год от года. Но также год от года возникает вопрос, какой ущерб будет нанесен экосистеме моря при дноуглубительных и строительно-монтажных работах.

Карское море одно из самых суровых русских морей. Частые штормы, низкая температура и минимальный безледный период делают море очень сложным для исследования. Но в то же время море обладает богатым ресурсным потенциалом, например, газ на шельфе, что делает море крайне интересным как объект изучения и вложения денежных средств. В частности, компания Газпром в 2012 ввела в эксплуатацию газопровод «Бованенково-Ухта», который позволил соединить Бованенковское месторождение с материком, посредством прокладки газопровода по дну Байдарацкой губы, для дальнейшей транспортировки.

В качестве объекта исследования была выбрана Байдарацкая губа Карского моря, где уже проложен газопровод Ямал-Центр.

Цель данной работы - воспроизвести динамику вод Байдарацкой губы Карского моря в безледный период на основе математического моделирования для решения задач о переносе примесей в акватории залива.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. на основании литературных источников дать физико-географическую характеристику Байдарацкой губы Карского моря;
2. используя программный комплекс «CARDINAL», воспроизвести динамику вод Байдарацкой губы Карского моря в безледный период;
3. рассмотреть особенности переноса примеси в акватории залива, попадающей в воду в зоне прокладки подводного газопровода;
4. обобщить и проанализировать полученные данные, обосновать возможное расположение точек мониторинга в акватории залива.

1 Байдарацкая губа Карского моря: физико-географическая характеристика и современное использование

1.1 Физико-географическое положение

Карское море – материковое окраинное море, относящее к бассейну Северного Ледовитого океана. Располагается восточнее острова Новая земля., которым море ограничено с запада. С востока граница проходит по архипелагу Северная Земля и по проливам Шокальского и Вилькицкого. Южной границей является материковое ложе – полуостров Ямал. [https://geographyofrussia.com/morya-rossii-karskoe-more/]

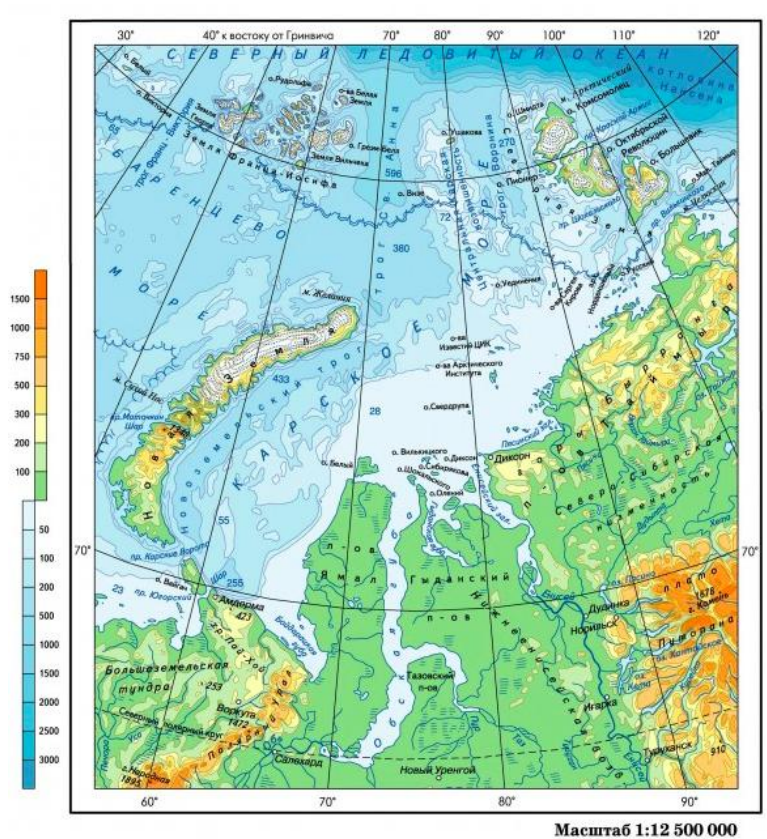


Рис. 1 Физико-географическое положение Карского моря

<https://geographyofrussia.com/morya-rossii-karskoe-more/>

Общие сведения: Площадь составляет 883 000 км². Объем вод около 98 000 км³. Средняя глубина составляет 111 м, а максимальная достигает 600 м. Береговая линия Карского моря неровная и сильно изрезанная. Воды моря омывают берега Новой Земли, сильно изрезанной фьордами. В ряде мест море резко вдается в сушу, образуя, например, Байдарацкую губу. Также вдоль береговой линии имеются крупные заливы, такие как Гыданский, Енисейский и Пясинский. Рельеф дна неоднороден. Центральные зоны отличаются относительно ровным рельефом, а прибрежные участки возвышенны. Также есть два глубоководных желоба – желоб Святой Анны, который простирается океан и Новоземельская впадина у берегов одноименного острова глубиной свыше 500 м. [<https://geographyofrussia.com/karskoe-more-2/>]

Физико-географические характеристики Байдарацкой губы

Байдарацкая губа – глубоко вдающийся в сушу залив в южной части Карского моря, находится между Югорским полуостровом и полуостровом Ямал. Длина около 180 км, ширина 78 км, глубина достигает 20 м. []

Рельеф дна губы имеет достаточно сложное строение. Современный субаквальный рельеф выражен в пределах подводного берегового склона в диапазоне глубин 0 – 15 м. Это зона наиболее активного гидродинамического воздействия на дно. Из-за ограниченного безледного периода и высокой динамичности природных условий и экосистем, которые крайне чувствительны к изменениям климата и антропогенным воздействиям, в акватории залива наблюдаются практически все опасные явления, характерные для шельфовых арктических районов. Исследования дна Байдарацкой губы свидетельствуют о наличии большого числа борозд длиной от 7-13 до 24-26 км и шириной около 5 км. Длинные оси ориентированы вдоль губы. Их происхождение связано с экзарацией дна ледяными образованиями. Борозды наблюдаются практически вдоль всей трассы перехода, и их глубины меняются в диапазоне от 0,4 до 2,5 м, в среднем 0,9 м. Наибольшее количество борозд замечено на бортах губы, на участках с повышенными величинами уклона дна, а на наиболее глубоких

участках трассы их количество снижается. В тектоническом отношении район залива расположен на борту Западно-Сибирской плиты между Уральской складчатой системой на западе и Юрибейской моноклиной на востоке. Плита сложена терригенными, угленосными и кремнисто-глинистыми морскими и континентальными формациями. Верхний слой представлен прибрежно – морскими осадками – суглинками и глинами, чередующимися с песками. Тонкодисперсные осадки характеризуются в основном повышенным содержанием растворимых соединений железа, марганца и органики.



Рисунок 2 - Байдарацкая губа Карского моря- другая картинка

1.2 Основные климатообразующие факторы и гидрологический режим залива

Основные климатообразующие факторы – радиационный режим, крупномасштабная циркуляция воздушных масс, которая связана с барико-циркуляционным режимом. В формировании локальных особенностей большую роль играет характер подстилающей поверхности.

Радиационный баланс. Высокоширотным положением Байдарацкой губы определяется годовой и суточный ход радиационного баланса. Выделяется полярная ночь, длиной до 40 суток и летний полярный день, длящийся около 60 суток. Большая часть коротковолновой солнечной радиации уходит обратно в атмосферу из-за большой отражающей способности подстилающей поверхности. В летние периоды зимнее радиационное выхолаживание не превышает летнее поглощение солнечной радиации и радиационный баланс в целом за год положителен.

Барико-циркуляционный режим. Хорошо выраженные сезонные особенности имеют крупномасштабные черты поля атмосферного давления и связанной с ней циркуляцией воздушных масс. Сибирский и Канадский антициклоны с октября по апрель располагаются над северной частью Евразии. Конкретно над Атлантико-Европейским сектором располагается барическая ложбина, вытянутая со стороны Исландской депрессии, на оси которой находится крупномасштабная климатическая фронтальная зона, разделяющая арктические и умеренные воздушные массы. Вдоль нее с запада на восток смещаются нередко штормовые глубокие циклоны, которые значительно влияют на климат рассматриваемого района, о чем свидетельствует особенно быстрое повышение давления к востоку от данного района. С мая по сентябрь над Сибирью располагается обширная барическая депрессия, а конкретно над Карским морем – область повышенного давления. Такое распределение атмосферного давления приводит к тому, что в летний период преобладают относительно слабые ветра с северной составляющей.

Подстилающая поверхность. Большую часть года – с октября по июль – подстилающая поверхность имеет слабое влияние на фоновые синоптические процессы ввиду того, что губа полностью покрыта льдом и имеет тепловую и светоотражательную однородность. Но вместе с тем, толщина снега и льда определяют дальнейшую величину запаздывания термического режима относительно солярного. Соответственно в безледный и

безснеговой период поверхность суши заметно теплее поверхностных вод, что в свою очередь обуславливает ярко выраженные локальные особенности погоды: высокая повторяемость низкой слоистой облачности и адвективных туманов при выносе сравнительно теплого воздуха с суши на холодную морскую поверхность. В солнечные летние дни может развиваться дневной бриз – развиваются на фоне малоградиентного барического поля местные замкнутые циркуляционные ячейки.

Ветровой режим. Из предыдущего пункта ясно, что направление преобладающих ветров существенно различно в холодный (ледовый) и теплый (безледный) периоды. Наблюдения проводились на ГМС Марре-Сале. Повторяемость преобладающих направлений в ледовый период юго-западного и южного направлений составляет 44%. Вероятность повторяемости остальных ветров невелика. В безледный период равновероятны все направления ветров за исключением юго-восточного.

Температура воздуха. Температурные условия смягчаются в осенне-зимний период вследствие влияния атлантических циклонов. Зимний минимум практически равновероятен в течение 3-ех месяцев – с января по март. Летний максимум приходится на июль-август и весьма близок к максимуму поверхностной температуры воды. Среднегодовая температура воздуха отрицательна, а среднемесячная температура воздуха отрицательна в период с октября по май.

Влажность воздуха. Относительная влажность воздуха высока в течении всего года. Средмесячные значения варьируются от 83% в зимний период до 90% в летний период. Минимум, наблюдаемый в ледовый период, связан с практически полным покрытием Байдарацкой губы льдом. Максимум обусловлен проникновением с севера влажного, морского, тального воздуха. Даже при выносе сухого континентального воздуха в тыловых частях антициклонов или в теплых секторах циклонов на холодную морскую поверхность он быстро охлаждается, что, конечно, приводит к росту его

относительной влажности. Когда заканчивается полярный день к этим факторам добавляется еще ночное выхолаживание, также приводящее к росту влажности.

О с а д к и . Среднегодовая сумма осадков невелика. Это связано с небольшим абсолютным влагосодержанием холодного арктического воздуха. Осадки выпадают чаще всего в связи с прохождением циклона.

С н е ж н ы й п о к р о в . Первый снежный покров устанавливается в конце сентября, а устойчивый – к середине октября. Сход снежного покрова происходит со второй декады мая. Общая продолжительность снегозалегания составляет около 250 дней.

В и д и м о с т ь . Так как арктический воздух отличается большой прозрачностью, дальность видимости в регионе исследования составляет нескольких десятков км. Основными ограничителями видимости выступают туманы и метели.

О б щ а я х а р а к т е р и с т и к а г и д р о л о г и ч е с к и х у с л о в и й . Гидрологический режим определяется высокоширотным географическим положением, мелководностью и открытостью в сторону Карского моря. Большую часть года губа покрыта сплошным льдом. Большая часть тепла из атмосферы поступает с июля до середины сентября. Основной приток пресной воды с речным стоком и вследствие таяния льда имеет место в июне-июле. Этими факторами и объясняется ярко выраженная сезонность гидрологических условий в губе. В период сплошного ледяного покрова (ноябрь-май) температура близка к точке замерзания ($-1,7^{\circ}\text{C}$), соленость в этот же период увеличивается от 32 до 34 ‰, в основном за счет осолонения при льдообразовании. В июне, соответственно, обратная ситуация. Соленость уменьшается до 23‰, что приводит к образованию сезонного пикноклина – слоя резкого изменения плотности воды по вертикали. В июне пикноклин находится в непосредственной близости от поверхности и имеет небольшую толщину (до 1 м). Даже несмотря на существенный приток тепла, температура

воды увеличивается лишь на пару градусов, вследствие масштабных теплотрат на таяние льда.

Динамика и гидрология вод. Так как Байдарацкая губа целиком находится в пределах мелководной зоны приливного Карского моря, динамика ее вод определяет термохалинную структуру, это является отличительной особенностью данного региона. Байдарацкая губа во внешней части широко открыта в сторону моря и, следовательно, подвержена разного рода динамическим воздействиям со стороны моря. В юго-западной части Карского моря отчетливо просматриваются приливные явления. Они в свою очередь обусловлены приливными волнами из Баренцева моря и из Северного-Ледовитого океана. Севернее острова Уединения эти волны соединяются. При подходе к берегу эти волны отражаются, интерферируют и, конечно, меняют свои характеристики. Все эти факторы очень усложняют приливную картину в море, где преобладают правильные полусуточные приливы. Около 150 см/с скорость приливных течений, что в значительной степени превышает скорость постоянных течений. Но изменения уровня вследствие приливов невелико (около 0,8 м). Многие источники свидетельствуют о том, что в море преобладает циклонический характер циркуляции вод. Это связано с:

- Обь-Енисейским течением со скоростью до 10 см/с, которое пересекает море от о. Белый до м. Желания на о. Новая Земля;
- Ямальское течение вдоль западного побережья п-ова Ямал со скоростью 10-15 см/с;
- Баренцевоморское течение с максимальными скоростями 25-30 см/с;
- Новоземельское течение, движущееся на юго-запад вдоль восточного побережья Новой Земли со скоростями до 15-25 см/с и замыкающее циклонический круговорот у пролива Карские ворота.

Приливные течения. Для характеристики пространственной изменчивости приливных течений рассмотрим эллипсы этих течений, представляющие собой траектории, которые описывают концы их векторов. На рис.1.4 приведены рассчитанные карты эллипсов приливных течений для полусуточных волн (M_2) и суточных волн (K_1) на акватории Байдарацкой губы. Стрелками указано направления вращения вектора течений. Согласно результатам гидродинамического моделирования максимальные скорости течений, генерируемых волной M_2 , достигают 54 см/с у о. Литке, а в районе перехода могут иметь 40 см/с, преобладающие направления течений в центральной части губы - северо-запад и юго-восток. На долготе залива Мутный генеральное направление течений приливной волны M_2 изменяется на северо-северо-западное – юго-юго-восточное. В прибрежных зонах и кутовой части губы скорости уменьшаются. На большей части акватории Байдарацкой губы вектор полусуточных приливных течений имеет циклонический характер. Максимальные скорости течений, генерируемых волной K_1 , не превышают 5 см/с рисунок 3. Генеральное направление течений в районе подводного перехода – запад-северо-запад – восток-юго-восток. В прибрежных зонах и кутовой части губы скорости также уменьшаются. Эллипсы приливных течений, возбуждаемые волной K_2 , имеют антициклоническое вращение в северной части Байдарацкой губы и циклоническое в южной, зона смены направлений вращения приходится на ось подводного перехода

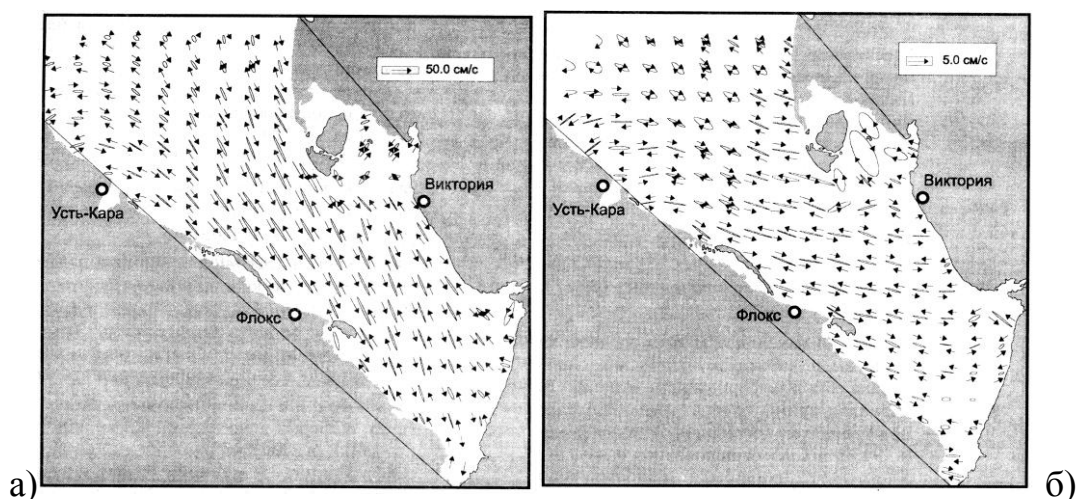


Рисунок 3 – Эллипсы приливных течений в Байдарацкой губе, рассчитанные на основании гидродинамического моделирования (модель ААНИИ) [4]:

а) полусуточной волны M_2 ; б) суточной волны K_1

Приливные колебания уровня. В районе перехода газопровода приливы имеют неправильный полусуточный характер, с небольшим влиянием мелководья, как у уральского так и у ямальского берегов, т.е. время падения приливного уровня превышает время его роста на 20 минут. Максимальная величина прилива в этом районе соответствует 0,8 — 0,9 м. Основными особенностями пространственной изменчивости приливов в губе являются:

- - существенное увеличение амплитуд полусуточных волн и суммарных приливных движений к вершине губы;
- - наличие выраженных амфидромий полусуточных волн вблизи о. Литке и амфидромий суточных волн вблизи пос. Харасавэй;
- - асимметрия приливных течений относительно оси губы: у уральского берега значения амплитуд колебаний уровня больше, а скоростей течений — меньше, по сравнению с ямальским берегом.

Характеристики суммарных приливных движений в пределах полумесячного сизигийно-квадратурного цикла на всей акватории губы существенно отличаются. В течение этого цикла сизигийные приливы наблюдаются спустя двое с небольшим суток после новолуния, а квадратурные — спустя столько же времени после первой (третьей) четверти Луны. Различия в величинах прилива между сизигией и квадратурой увеличиваются по направлению к вершине губы [4]. Распределение амплитуды волны M_2 характеризуется постепенным уменьшением от 50 см у вершины Байдарацкой губы до 17 см вблизи открытой границы. У волны K_2 амплитуда постепенно уменьшается от 6 см в районе перехода до 2-3 см вблизи открытой границы [4].

Термохалинный режим. В Байдарацкой губе присутствуют морские воды с хорошо выраженными признаками распреснения и сравнительно низкими температурами воды. По солевому составу воды рассматриваемого района относятся к морским распреснённым водам хлоридного класса натриевой группы. В период с ноября по май, когда залив покрыт сплошным льдом, температура воды близка к точке замерзания от $-1,7$ до $-1,8$ °C во всём слое от поверхности до дна, солёность воды в этот период монотонно увеличивается от 32 до 34 ‰, в основном, за счёт локального осолонения при льдообразовании. Увеличение температуры происходит в тот же период, что и уменьшение солёности, т. е. приблизительно с 22 мая [4]. Начиная с третьей декады мая, за счёт таяния льдов и увеличения речного стока, солёность уменьшается до 23 ‰. Что в свою очередь приводит к сезонному пикноклину — слою резкого изменения плотности воды по вертикали. В июне он залегает в непосредственной близости от поверхности и имеет толщину порядка 1 м. На 26 июня приходится абсолютный минимум солёности. В июне идёт существенный приток тепла из атмосферы, но несмотря на это, даже в поверхностном слое, температура увеличивается только на 1 °C в следствии обильных теплотрат на таяние льда. Только со второй половины июня значения температуры переходят к положительным. По данным многолетних наблюдений переход к положительным значениям в среднем совпадает с датой абсолютного минимума солёности 26 июня [4]. В июле солёность поверхностного слоя вод уменьшается лишь на 1 ‰, т.е. интенсивность распреснения становится меньше на порядок, хотя приток талых вод лишь на 2,5 раза уступает июньскому. Такие изменения связаны с увеличением объёма вод верхнего квазиоднородного слоя вследствие волнового перемешивания с 1 до 3-4 м. Температура увеличивается более чем на 4 °C, т. к. всё тепло из атмосферы концентрируется в верхнем квазиоднородном слое. Значения солёности и температуры в придонном слое даже в этот период незначительно отличаются от наблюдаемых зимой [4]. В августе температура поверхностного слоя достигает своих максимальных значений. В это время резко уменьшается

приток пресных вод, а рост толщины верхнего квазиоднородного слоя и вовлечение в него более солёных нижележащих вод увеличивается. В связи с этим происходит увеличение солёности на 1,5 ‰. За счёт турбулентного перемешивания продолжается увеличение глубины залегания пикноклина и его толщина достигает 10 м. другим следствием турбулентного перемешивания является увеличение температуры придонного слоя с отрицательных значений до 1-3 °С [4]. В сентябре начинается процесс теплоотдачи из Байдарацкой губы в атмосферу. Это приводит к некоторому уменьшению температуры верхнего слоя воды и увеличению солёности, дальнейшему заглублению и ослаблению сезонного пикноклина. Уже к середине октября, в результате конвективного перемешивания, сезонный пикноклин разрушается. Переход от положительных значений температуры к отрицательным приходится на 12 октября, 31 октября она уже достигает уровня значений ледового сезона. Необратимое повышение солёности начинается 2 октября. Уровня значений ледового сезона она достигает 8 декабря. Таким образом, при переходе к ледовому сезону более интенсивной характеристикой становится солёность, что связано с меньшей скоростью осолонения при ледообразовании по сравнению с интенсивностью осеннего охлаждения воды [4]. Описанный выше климатический годовой цикл изменчивости термохалинной структуры обусловлен, главным образом, локальными факторами: потоками тепла через поверхность губы, пресной воды за счёт речного стока и ледотаяния, соли при ледообразовании, ветровой и приливной мелкомасштабной турбулентностью. В климатическом режиме воды Байдарацкой губы представляют собой единую водную массу — региональную прибрежную модификацию Арктической поверхностной водной массы, характеристики которой испытывают значительную сезонную изменчивость, находясь в непосредственном контакте с внешними режимообразующими факторами.

1.3 Современное использование акватории Байдарацкой губы и прилегающих территорий

Активное изучение Байдарацкой губы Карского моря началось в августе-сентябре в 1987-1988 гг. по заказу ОАО «Газпром» в связи с предполагаемым строительством подводного газопровода через Байдарацкую губу. В январе 2002 года правление ОАО «Газпром» определило полуостров Ямал зоной своих стратегических интересов. Выход в эту область имеет для компании принципиальное значение. С 2008 года велись наблюдения с постоянных и временных буйковых океанографических станций для экологического мониторинга. Экологический мониторинг проводился с целью оценить влияние строительно-монтажных работ при прокладке газопровода на экосистему акватории. Строительно-монтажные работы включали в себя: дноуглубление с целью обеспечения судоходных глубин. При этом использовались землесосные снаряды (дноуглубительные суда) двух типов: без разрыхлителей (при легких несвязных грунтах), с гидравлическими разрыхлителями (при легкоразмываемых грунтах), с механическими и комбинированными фрезерно-гидравлическими разрыхлителями (при плотных несвязных и связных грунтах). При тяжелых глинистых и сильно трещиноватых скальных грунтах применяют многочерпаковые земснаряды.

Дноуглубительные суда бывают самоходные и несамоходные, служат для выемки и удаления грунта с целью увеличения или поддержания необходимых глубин. Дноуглубительные снаряды по способу выемки грунта делят на землечерпательные снаряды (одно- и многоковшовые) и землесосные снаряды, а по способу транспортировки грунта на место укладки — на самоотвозные, шаландовые (сваливающие грунт в грунтоотвозные шаланды). Дноуглубительные суда вместе со вспомогательными судами (буксировщиками, промерным катером, плавучим грунтопроводом и др.), обеспечивающими проведение дноуглубительных работ на определённом участке, называются дноуглубительным караваном. В Байдарацкой губе работы ведутся всеми перечисленными типами судов.

Землесобный снаряд — плавучая землеройно-транспортная машина непрерывного действия. Всё его оборудование — грунтовый насос, двигатель, всасывающий и напорный трубопроводы, плавучий пульпопровод, механизмы передвижения, вспомогательное оборудование. Для интенсификации грунтозабора применяют механические или гидравлические (в лёгких грунтах) разрыхлители. Наибольшее распространение получили механические разрыхлители. Земснаряд (ЗС) предназначен для разработки, выемки и перемещения грунта.

Различают два вида земснарядов:

- земснаряды, которые перекачивают грунт со дна водоёма и выбрасывают тут же по трубе (рис. 1.7). В Байдаракской губе ими (земснаряды «Диксон», «Олег Стрельчя») велись работы в прибрежной зоне на глубинах менее 8 м [8];

- самоотвозные земснаряды (рис.1.8), которые отвозят грунт и сваливают в местах временного дампинга. В Байдаракской губе ими осуществляла прокладка траншей на глубоководном участке перехода.



Рисунок 4 — Дноуглубительные работы в Байдарацкой губе. Земснаряд «Олег Стрельчenea». 2009 год



Рисунок 5 — Дноуглубительные работы в Байдарацкой губе. Самоотвозной земснаряд UTRECHT. 2009 год



Рисунок 6 — Земснаряд с механическим разрыхлителем грунта

Наиболее активно в Байдарацкой губе используются земснаряды с механическим разрыхлителем грунта (рис.1.8, 1.9), предназначенные для разработки грунта с глубиной грунтозабора до 30 метров и производительностью по грунту III категории - 3000 м³/час .

Искусственные поля взвеси образуются при всех видах подводных земляных работ. Наибольшую опасность для морской среды представляют дноуглубительные работы и сброс грунта в безветренную погоду, т.к. именно она способствует сохранению высоких концентраций взвеси в районе проведения работ и дампинга грунта. Действие ветровых течений приводит к увеличению скорости разбавления. Для приливных потоков характерна относительная однородность по глубине. По предварительным оценкам разнос пятен загрязнения акватории грунтовой смесью при дампинге не превышает 2,5-3 км от места сброса [4]. Пример результатов гидродинамического моделирования распространения взвеси представлен на рис. 2.5

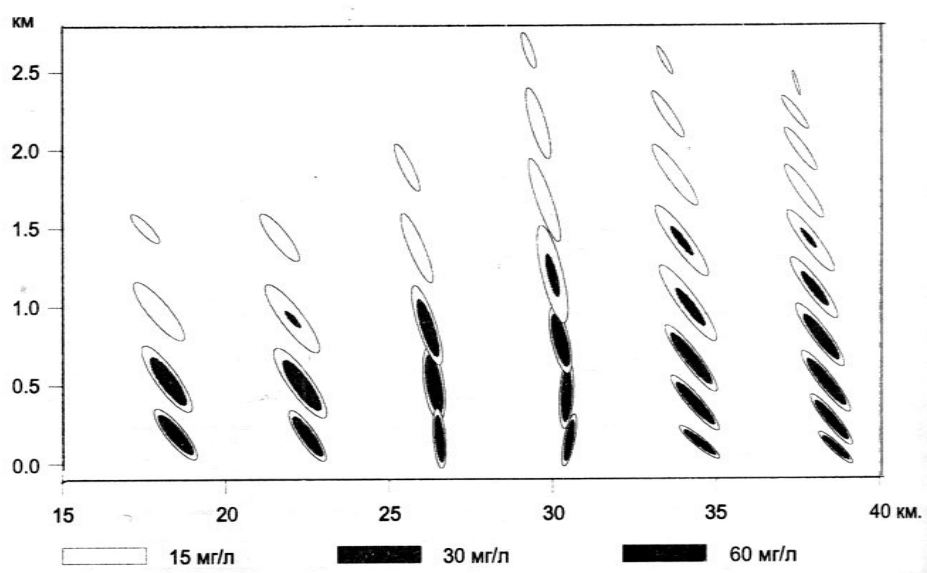


Рисунок 7 – Распространение взвеси при сбросе грунта вдоль участка трассы перехода через равные промежутки времени [4]

На прибрежном мелководье большие объёмы работ, выполняемые на ограниченной площади при малой глубине в течение длительного времени, интенсивное волновое воздействие — всё это способствует быстрому формированию здесь обширных полей высокой концентрации взвеси в течение всего периода рытья и засыпки траншей.

Оценки экспертов показали, что за время работы дноуглубителя в воду Байдарацкой губы поднимается 1710 тыс. т грунта, максимальное количество единовременного содержания взвеси в воде составляет 8 тыс. т. Максимальная площадь распространения взвеси составляет 12 км² при концентрации 0,25 мг/л выше фоновой, а при концентрации 100 мг/л выше фоновой на 5 км² [2].

Наблюдения за распространением взвешенных веществ в рамках мониторинга позволили косвенно оценить время существования повышенных концентраций в зоне работы при обратной засыпке траншей и устройстве перемычек (2009 год, рис. 2.7). А также при дампинге грунта шаландами (2009 год, рис. 2.8). Как видно из представленных распределений (рис 2.6-2.9), через 12 часов концентрация взвеси в придонном слое в несколько раз, достигая фоновых значений. При этом максимальные концентрации наблюдались в непосредственной близости к месту проведения работ в придонном слое.

Особого внимания заслуживает тот факт, что наблюдения за содержанием взвешенных веществ после окончания шторма (рис. 2.10). Так концентрации взвеси в поверхностном слое возросли в 3-4 раза относительно наблюдавшихся до шторма (рис. 2.7 - 2.8).

2. Математическое моделирование динамики вод и переноса примеси в Байдаракской губе Карского моря

2.1 Постановка задачи

Уравнения заданы в гидростатическом приближении и решаются в криволинейной системе координат с заданными граничными условиями.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\
 & = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + f_c v + K \left(u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\
 & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\
 & = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + f_c u + K \left(u \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\
 & \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \omega_s \\
 & \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = \varpi_s \\
 & \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \omega_s T_s + K_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{(1 - \alpha_w)}{\rho_0 c_p} \frac{\partial SW}{\partial z} \\
 & \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \omega_s S_s + K_s \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial S}{\partial z} \right) \\
 & \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_0) \frac{\partial c}{\partial z} = \omega_s c_s - \lambda c + K_s \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial c}{\partial z} \right) \\
 & \tau_{s(x)} \equiv \rho_0 v_t \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} = \rho_a C_D W_x |\overline{W}| \\
 & \tau_{s(y)} \equiv \rho_0 v_t \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} = \rho_a C_D W_y |\overline{W}| \\
 & \tau_{b(x)} \equiv \rho_0 v_t \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=-h} = -\rho_0 f_b u |\overline{v}| \\
 & \tau_{b(y)} \equiv \rho_0 v_t \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=-h} = -\rho_0 f_b v |\overline{v}|
 \end{aligned}$$

Пояснения величин в уравнениях:

G – ускорение свободного падения;

$\rho(T, S)$ – плотность воды, определяемая по температуре и солёности;

ρ_0 – среднее значение плотности воды;
 P_a – атмосферное давление;
 $F_c = 2\omega \sin \varphi$ - параметр Кориолиса;
 ω - угловая скорость вращения Земли;
 φ - географическая широта;
 K – коэффициент горизонтального турбулентного обмена;
 V_T – коэффициент вертикального турбулентного обмена;
 U и V – удельные расходы: $U = \int_{-h}^{\zeta} u dz$; $V = \int_{-h}^{\zeta} v dz$
 H – невозмущенная глубина воды;
 W_0 – скорость осаждения или всплывания взвешенных частиц;
 λ - коэффициент неконсервативности примеси;
 K_c – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии;
 V_s – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии;
 ω_s – расход сбросной воды из источников на единицы объема;
 ϖ_s – расход сбросной воды из источников на единицу площади поверхности;
 c_s – концентрация примеси в сбросной воде источников;
 T_s – температура сбросной воды источников;
 S_s – соленость сбросной воды источников;
 C_{Hs} – концентрация нефтепродуктов в сбросной воде источников;
 U_w V_w – компоненты скорости дополнительного ветрового дрейфа нефтепродуктов в поверхностном слое;
 C_p – удельная теплоемкость воды, которая задавалась равной 3990 Дж/кг°К;
 SW – падающая на подстилающую поверхность коротковолновая солнечная радиация;
 α_w – альбедо воды;
 Координата z направлена вертикально вверх;
 F_b – коэффициент придонного трения ($f_b = \frac{gn^2}{H^{1/3}}$);
 C_D – коэффициент ветрового волнения;

$\bar{W}$ – скорость ветра на высоте 10 м;

ρ_a – плотность воздуха;

Граничные условия. На жидкой границе в створе реки Яро-Яхе задавался постоянный расход $250 \text{ м}^3/\text{с}$. На жидкой границе между Карским морем и Байдарацкой губой задавалось два типа условий:

- условие свободного протекания;
- изменение уровня на ямальском и уральском берегу на основании данных программы Tide;

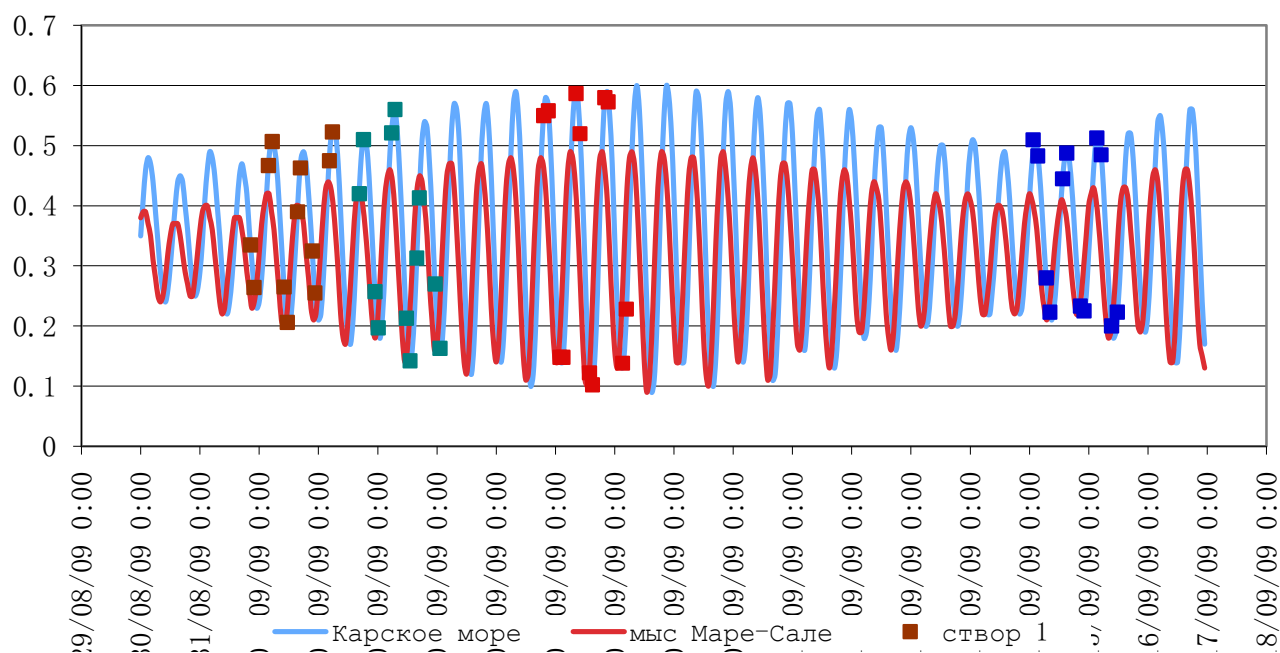


Рисунок 8 Предвычисленные приливы в период август-сентябрь 2009 года;

На границе океан-атмосфера использовались данные по ГМС Марре-Сале за период с 25.08.2009 по 30.09.2009 с дискретностью 6 часов.

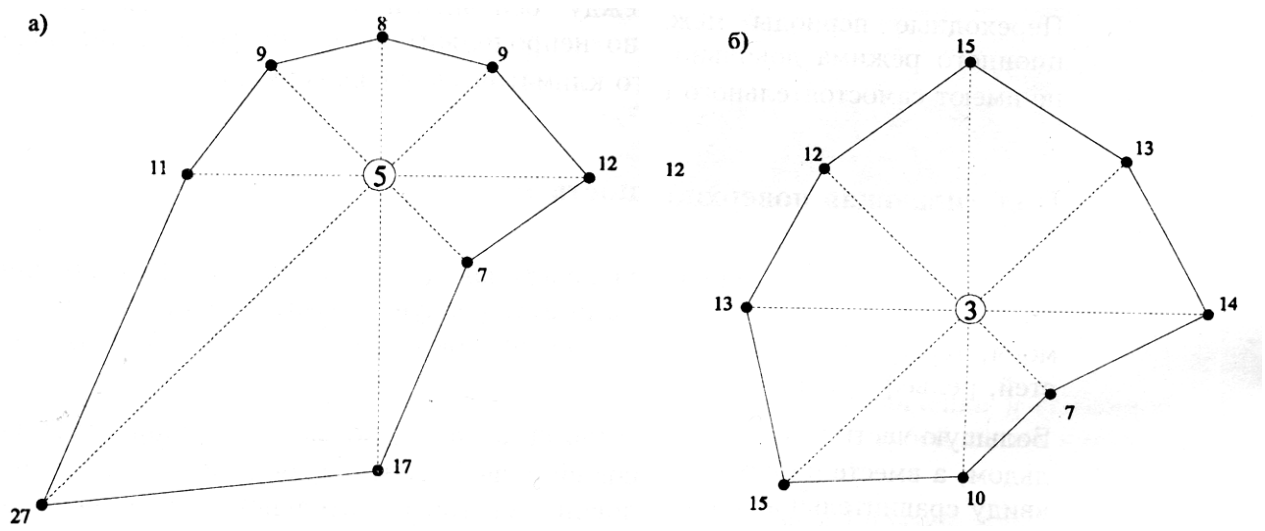


Рисунок 9 – Розы ветров (повторяемость в %) для ледового (а) и безледного (б) периодов на ГМС Марре-Сале. В центре повторяемость штилей [4]

2.2 Расчетная область и задание граничных условий

В расчетной области были заданы шаги во времени (150 секунд) и пространстве (3,5 на 1,5 мм).

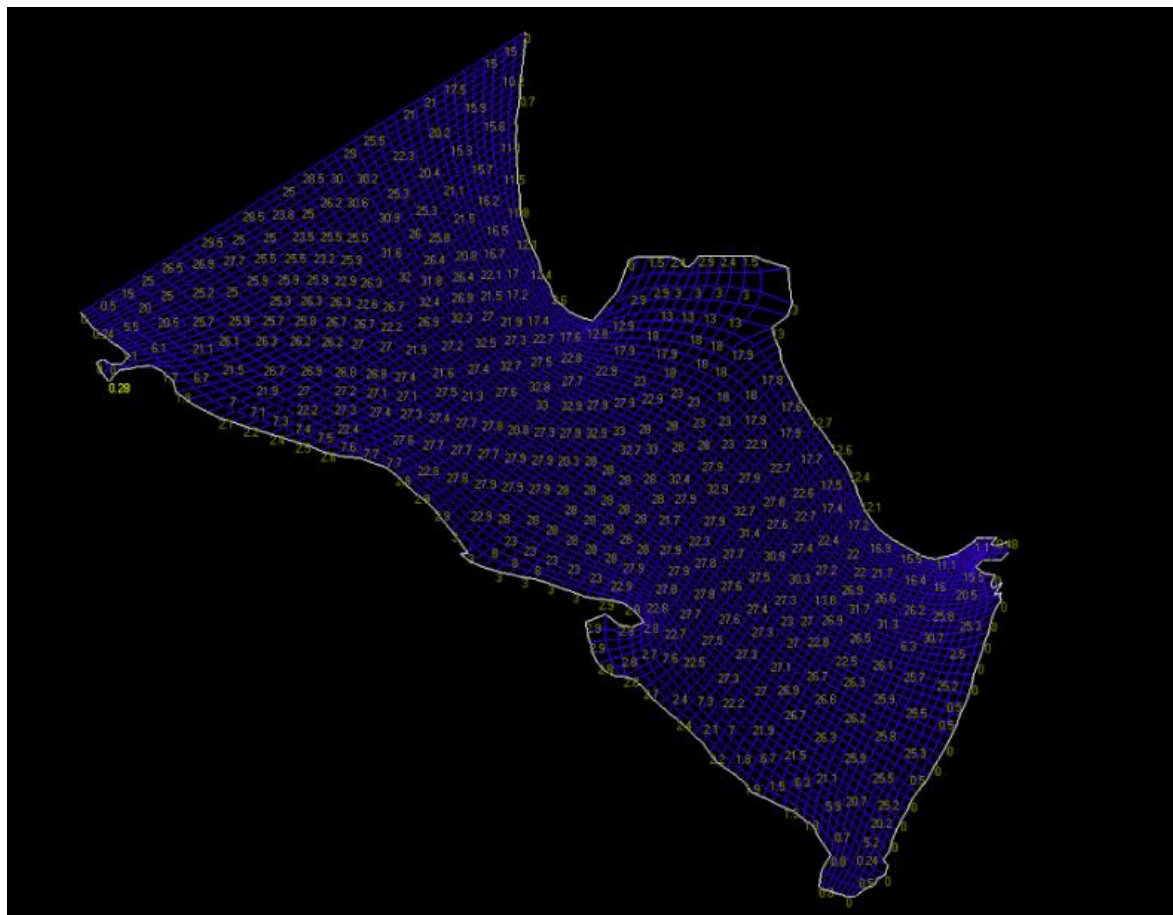


Рисунок 10 Расчетная область с сеткой и глубинами.

Определенная сложность при выполнении задания возникла из-за криволинейности исследуемого района. На рисунке — отчетливо просматривается сложность исходных данных.

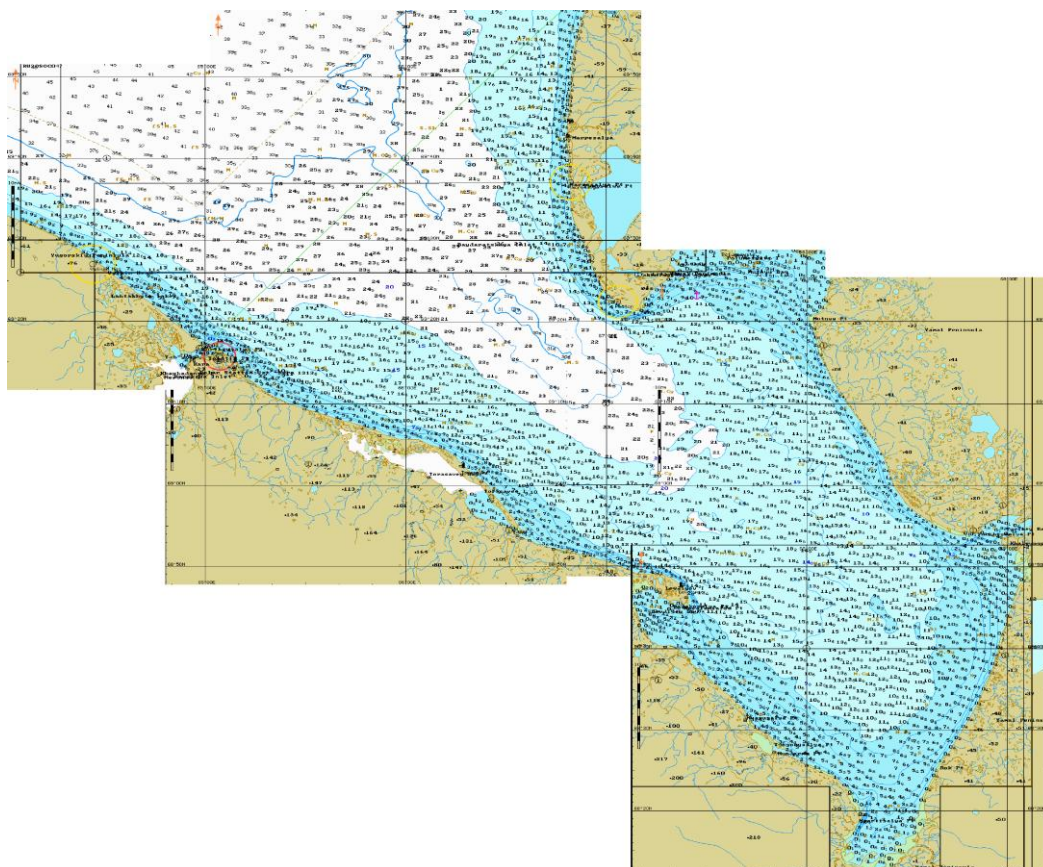


Рисунок 11 – Расчетная область до обработки в программном комплексе “Cardinal”

3. Результаты математического моделирования динамики вод и переноса примеси в акватории Байдарацкой губы

3.1 Динамика вод залива в период август-сентябрь 2009 года по результатам математического моделирования

3.1.1 Изменение динамики вод при заданном расходе уровня реки Яро-Яхе.

Исходные данные заданы в пункте 2.1 Из данных графиков видно, как устанавливалось течение при влиянии только стока реки. Рисунок 12 а модель до установления в ней течения. Рисунок 12 б начало поступления воды из реки Яро-Яхе, здесь видно, что скорость в устье реки гораздо выше, нежели при дальнейшем ее распространении. На рисунках 12 в-д уже наблюдается установившееся течение и его изменение с течением времени. Зона максимальных скоростей сместилась к границе с Карским морем, что связано с заданными граничными условиями. К концу расчетов (рисунок 12 д) в район газопровода наблюдается участок с увеличенным значением скорости, что скорее всего связано с влиянием трения о дно.

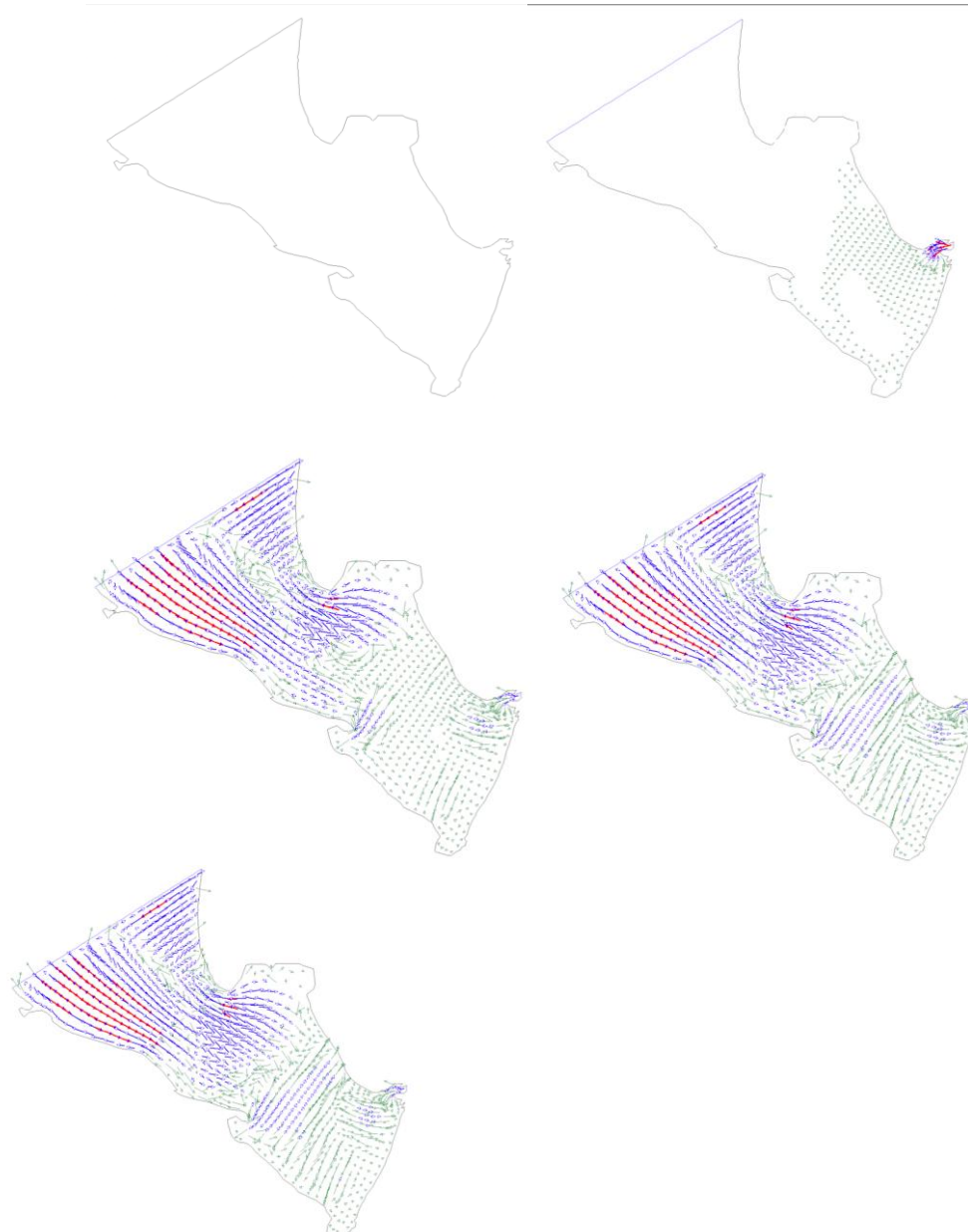


Рисунок 12 (а, б, в, г, д)

3.1.2 Изменение динамики вод под влиянием приливо-отливных явлений и при условии свободного протекания вод

В данной модели граничные условия были наложены на уже построенную модель с известным расходом реки. Здесь наблюдается установление течения по такой же схеме, что и в пункте 3.1.1. То есть другими словами по графику невозможно увидеть влияние приливо-отливных явлений.

Зато в построенном графике изменения хода уровня залива отчетливо прослеживается сизигия и квадратура. (Рисунок 13д).

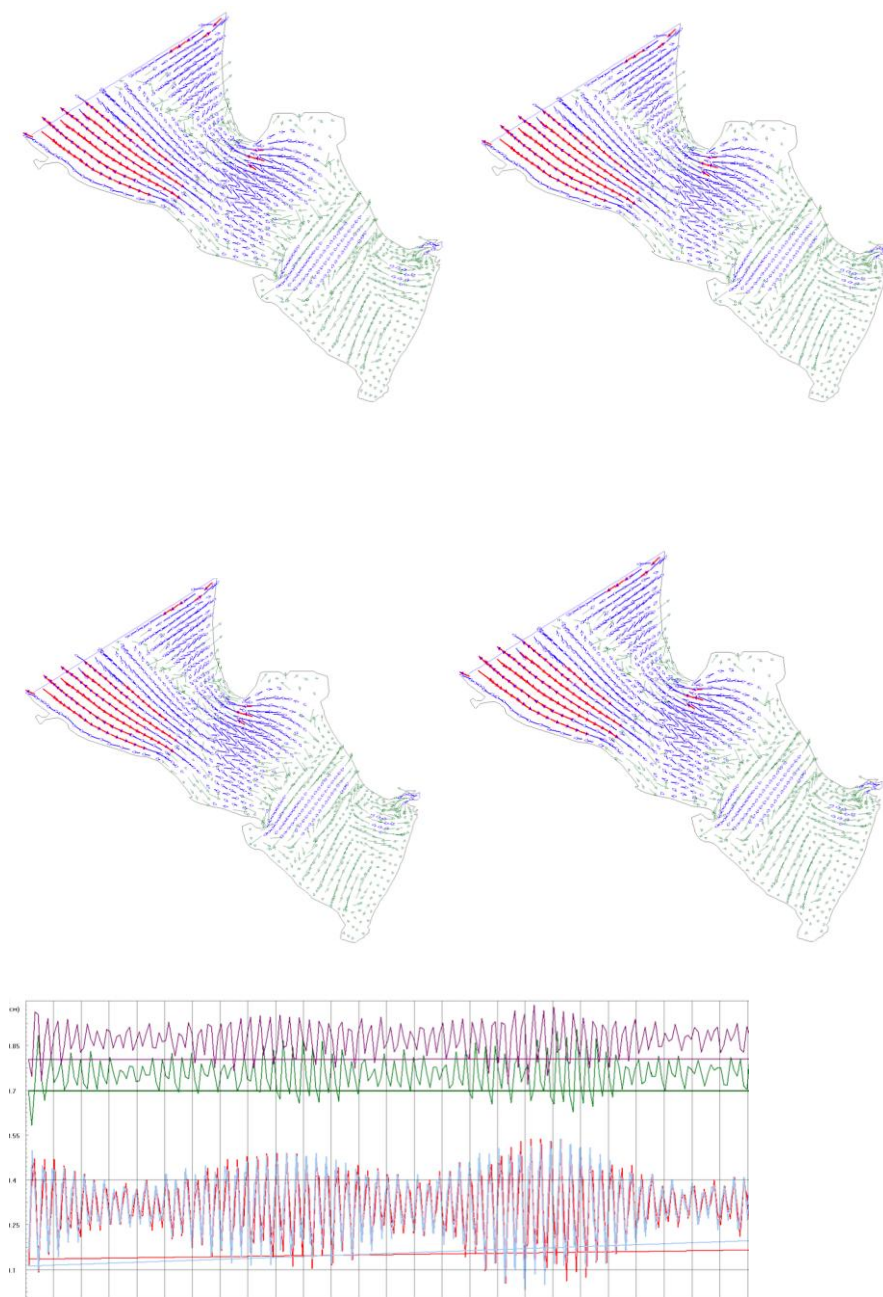
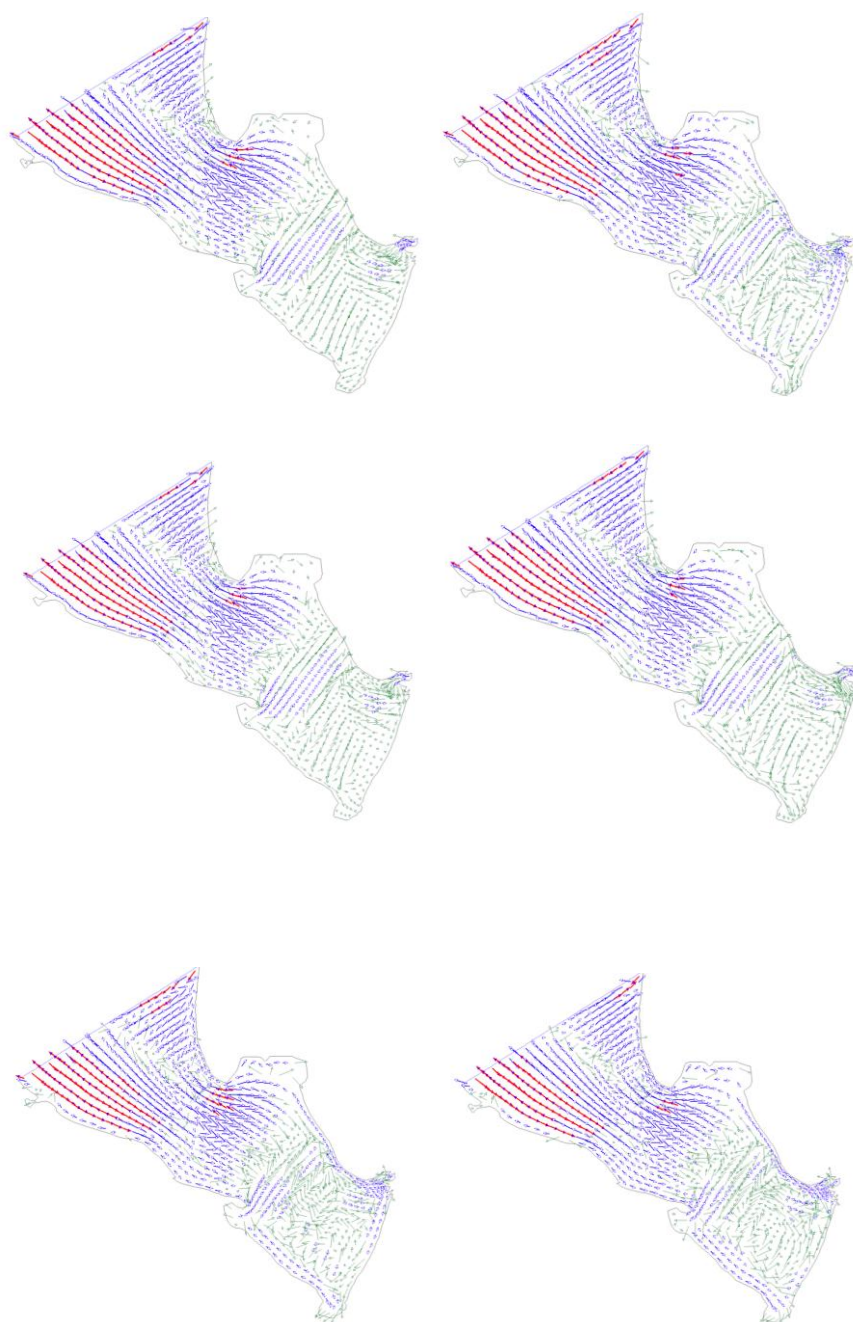


Рисунок 13 (а, б, в, г, д)

3.1.3 Изменение динамики вод под влиянием касательного напряжения трения ветра и приливно-отливных явлений

В этой модели также данные о ветре накладывались на уже построенную модель с приливно-отливными явлениями. На рисунках а-ж наблюдается очень динамичное изменение направлений течений. Особенно ярко эта тенденция прослеживается на рисунках 14 з, 14 и, где наблюдается также увеличение скорости течений. Это связано с высокой скоростью ветра, особенно ветра северо-восточного направления.



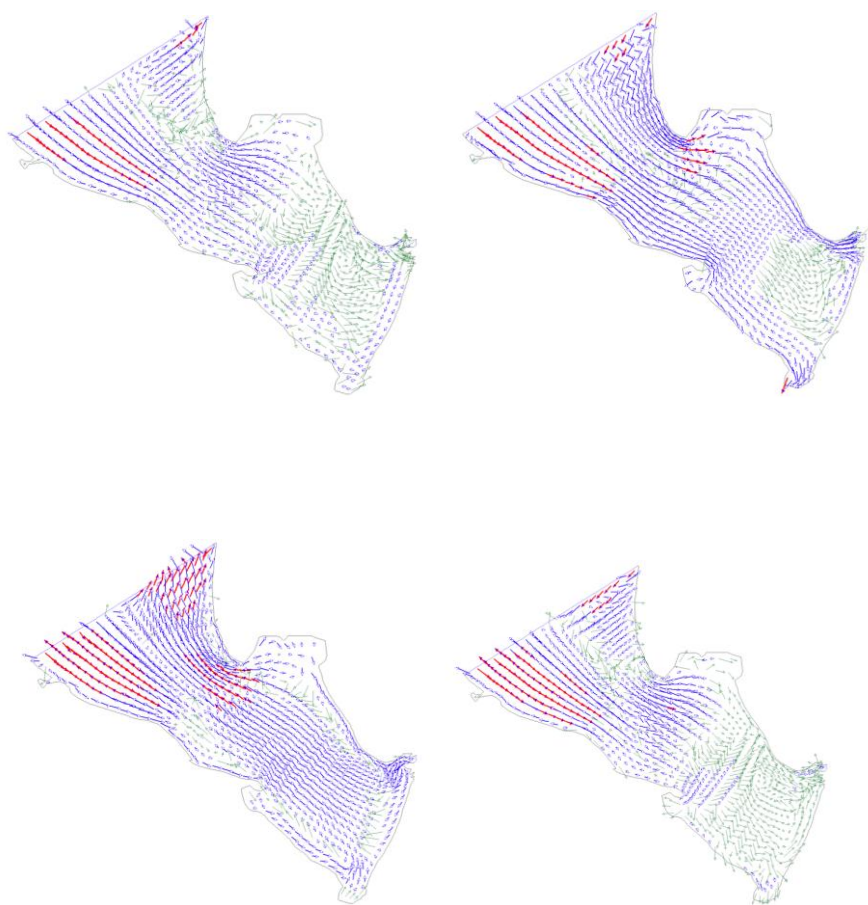
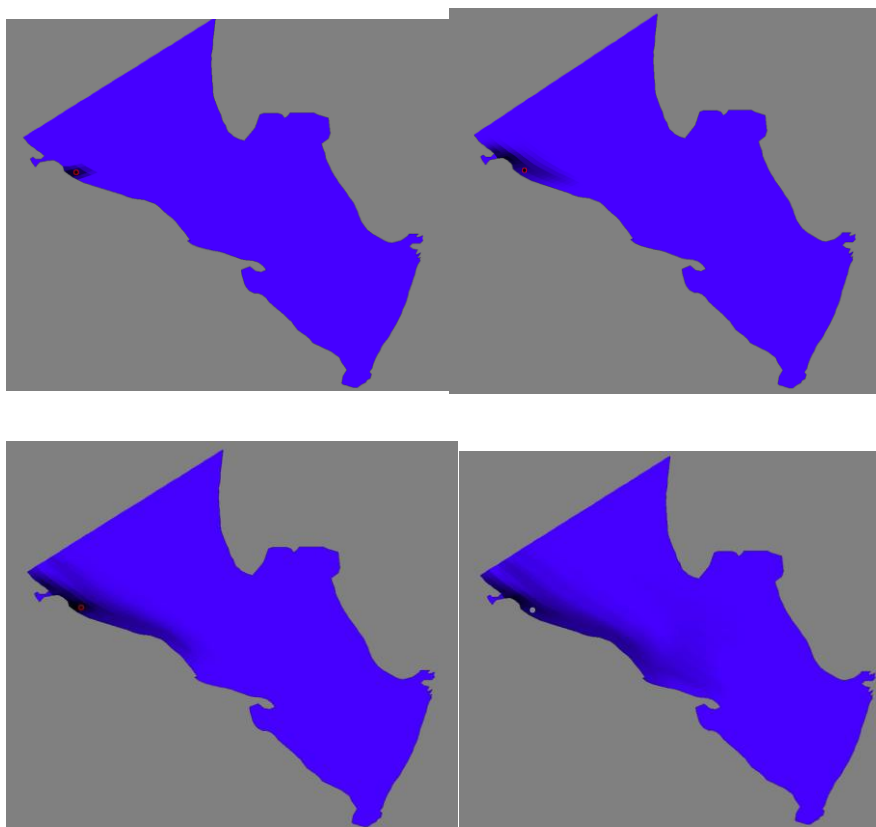


Рисунок 14 (а, б, в, г, д, е, ж, з, и, к)

3.2 Динамика взвесей

3.2.1 Непрерывный источник с максимальным выбросом

В данном случае анализировался точечный источник, находящийся на небольшой глубине у побережья и работающий в период с 25 августа 2009 по 1 октября 2009 в одном и том же месте по 12 часов. Из ранее проанализированных графиков видно, что скорость у уральского побережья максимальна, поэтому примесь переносится течением с достаточно большой скоростью по тем же изолиниям. На рисунке 15а источник в момент начала своего действия и далее прослеживается тенденция увеличения площади воздействия взвеси. Но также прослеживается уменьшение концентрации взвеси в акватории.



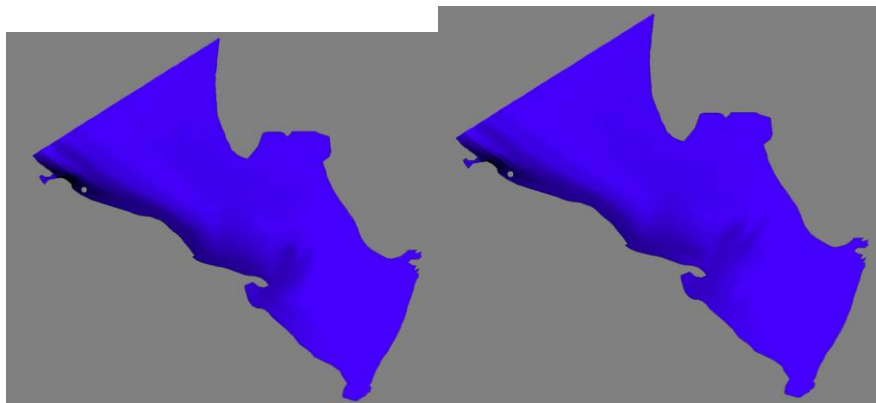


Рисунок 15 (а, б, в, г, д, е)

3.2.2 Движущийся попеременно работающий источник

Начальные условия были заданы таким образом: источник каждые 10 дней передвигался с востока на запад, в первую декаду работал по 12 часов в сутки, во вторую по 6 и в третью также 6 часов с перерывом в 12 часов.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что взвесь с течением уже в первые дни работы источника перенеслась к зоне интенсивных скоростей, но максимальная концентрация на протяжении всего времени наблюдени сохранилась, конечно, в районе расположения источников. Во время второй декады взвесь распространилась к югу от источника и пятном небольшой концентрации сформировалась в юго-восточной части акватории. Максимальная концентрация взвеси наблюдается на рисунке 16д, это связано с тем, что в этот период источник работал с минимальным перерывом и, соответственно, взвесь концентрировалась очень активно.

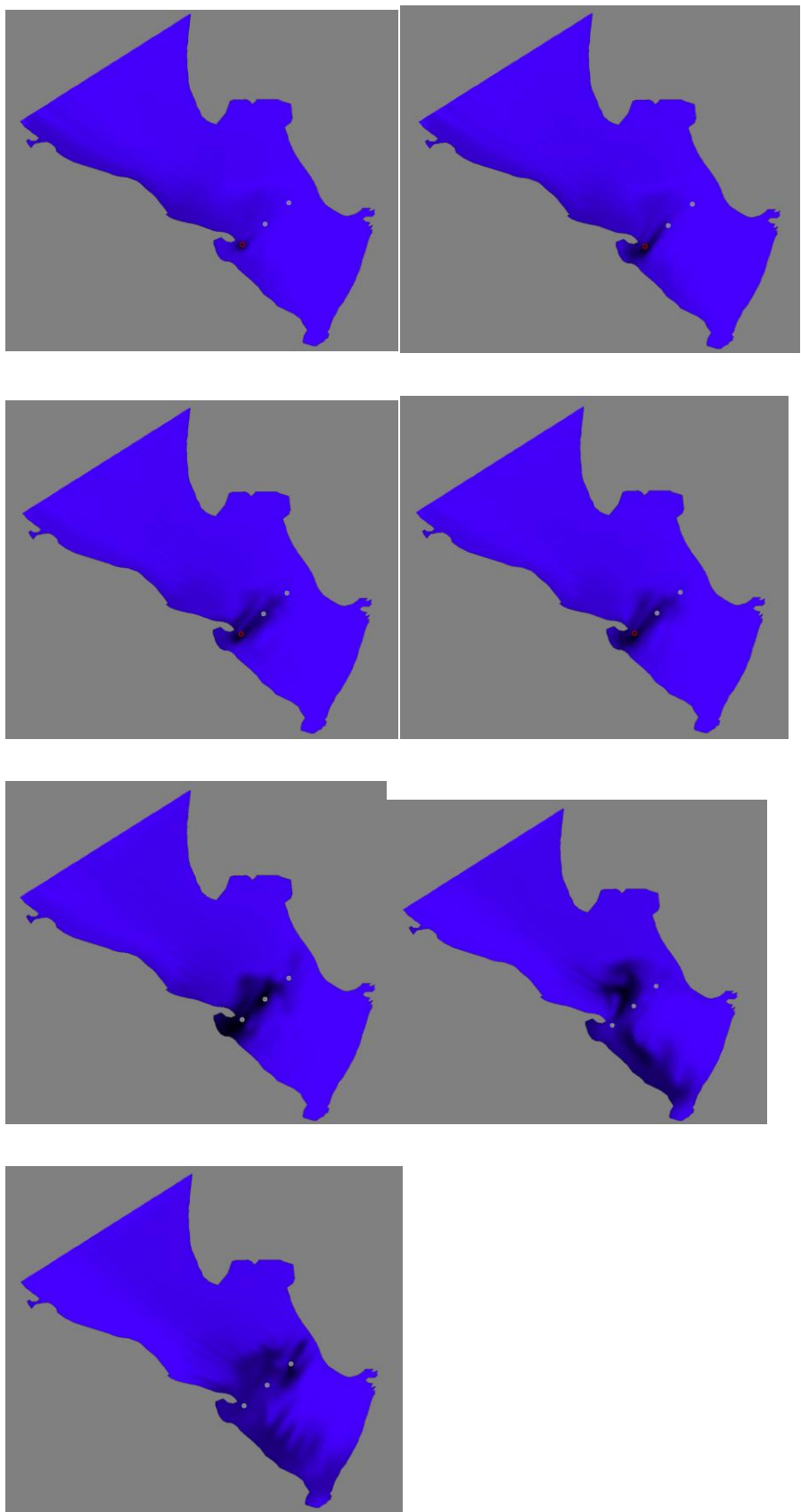


Рисунок 16 (а, б, в, г, д, е, ж)

3.2.3 Движущийся источник с заданной скоростью оседания.

Начальные условия в этом эксперименте заданы так же как и во втором и также задана скорость оседания ила. Это случай близок к реальным условиям, так как взвесь не остается у поверхности после взмучивания, часть ее оседает и скорость ее распространения по акватории заметно снижается. Что и видно по построенным рисункам. Взвесь сконцентрирована около источника в каждую декаду и практически не переносится течениями.

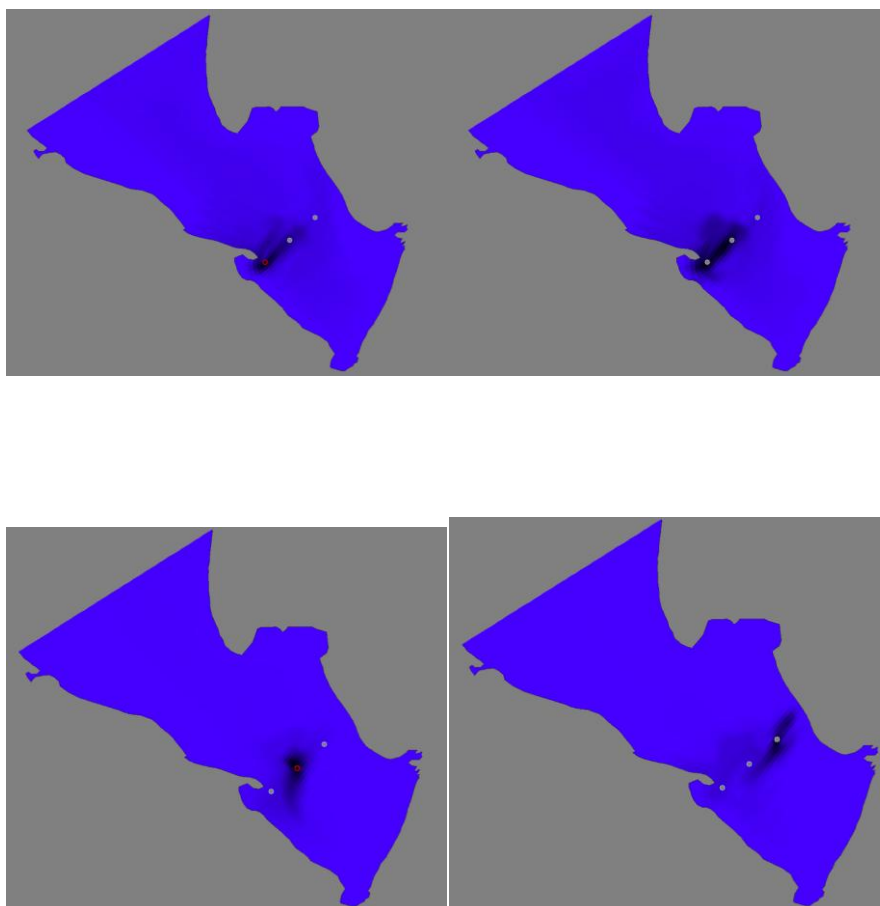


Рисунок 17 (а, б, в, г)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были получены следующие результаты: на основании физико – географического исследования был изучен заданный район, его особенности и рассмотрено современное использование акватории Байдарацкой губы.

Была воспроизведена динамика вод залива и произведен анализ полученных результатов.

Также удалось понять, где лучше проводить экологический мониторинг.

Вывод: исходя из построенных рисунков, можно сделать вывод, что в Байдарацкой губе множество факторов, влияющих на перенос и концентрацию взвеси. Но так как модели строились для однослойного моря они не столь информативны как если бы в анализ были включены модели в послойным распределением характеристик. Это приблизило бы модель к более реальным условиям. Также в режиме «многослойности» в модель включался учет влияния солености и температуры, которые несомненно влияют на динамику вод. Но данный эксперимент позволил нам понять, в какой части залива нужно расположить точки экологического мониторинга. Конечно, в зоне прохода газопровода, и у уральского и ямальского побережья, где взмучивание происходит под воздействием штормовых явлений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1	Степанова В.Б. Материалы исследования зообентоса Байдарацкой губы [Электронный ресурс] / В.Б. Степанова.– Режим доступа: http://www.ipdn.ru/rics/doc0/DR/gi-ste.htm
2	Моря России. Карское море. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://geographyofrussia.com/morya-rossii-karskoe-more/
3	Россия открывает строительство нового газопровода. Интернет-журнал Point.ru [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://news.mail.ru/economics/1393249/
4	Природные условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов «Ямал-Центр» [Текст].- М.: Изд. «ГЕОС», 1997.- 432 с.
5	Камалов А.М. Морфолитодинамика берегов и дна Байдарацкой губы [Электронный ресурс]/ А.М. Камалов, С.А. Огородов, В.Ю. Бирюков, Г.Д. Совершаева, А.С. Цвечинский, В.В. Архипов, Н.Г. Белова, А.И. Носков, В.И. Соломатин — Криосфера земли.- 2006.- вып. 3— Режим доступа: http://www.izdatgeo.ru/pdf/krio/2006-3/3.pdf
6	Сайт ОАО «Газпром». [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.gazprom.ru/press/news/2008/august/article56687/
7	Владимиров А.М. Охрана окружающей среды [Текст] / А.М. Владимиров, Ю.И. Ляхин, Л.Т. Матвеев, В.Г. Орлов — Л.: Гидрометиздат, 1991. — 192 — 201 с.
8	Мегапроект «Ямал» //ОАО «Газпром» [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.gazprom.ru/production/projects/mega-yamal/
9	Шкундин Б. М. Землесосные снаряды [Электронный ресурс] / Б.М. Шкундин — режим доступа: http://slovari.yandex.ru/~книги/БСЭ/Землесосный%20снаряд/

1 0	Оценка экологических последствий строительства и эксплуатации подводного перехода магистрального газопровода через Байдарацкую губу. [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ibrae.ac.ru/docs/3(15)/072_078_ARKTIKA_3(15)_09_2014.pdf
1 1	Программа комплексных морских инженерных изысканий по объекту «Подводный переход через Байдарацкую губу» в составе стройки «Система магистральных газопроводов Бованенково - Ухта» и для изучения участка 1, 2, 3, 4, 5-ой и 6-ой нитки. [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.приуральскийрайон.рф/upload/iblock/ab0/Programma_po_Baydare.pdf