

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

(магистерская диссертация)

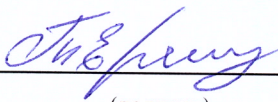
На тему Адаптация модели Delft-3D на район Обской губы

Исполнитель Плешанов Дмитрий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель канд. геогр. наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Чанцев Валерий Юрьевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой 
(подпись)

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

Еремина Татьяна Рэмовна
(фамилия, имя, отчество)

«19» июля 2017 г.

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

(магистерская диссертация)

На тему Адаптация модели Delft-3D на район Обской губы

Исполнитель Плешанов Дмитрий Александрович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель канд. геогр. наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Чанцев Валерий Юрьевич

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

канд. физ. - мат. наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Еремина Татьяна Рэмовна

(фамилия, имя, отчество)

«___» _____ 2017 г.

Санкт-Петербург

2017

Оглавление

	стр.
СОКРАЩЕНИЯ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Описание области исследования.....	6
1.1 Географическое описание.....	6
1.2 Термохалийные особенности	9
1.3 Гидродинамические особенности.....	19
2 Описание вычислительной модели	22
2.1 Ключевые особенности.....	26
2.2 Уравнения гидродинамики и переносов, используемые в модели.....	27
2.3 Граничные условия.....	34
2.4 Модель тепла.....	37
2.5 Приливные силы.....	40
2.6 Численная схема.....	41
2.7 Расчетная сетка.....	43
2.8 Графический интерфейс модели и входные файлы.....	50
3 Адаптация модели Delft3D на акваторию Обской губы.....	63
3.1 Расчетная сетка.....	63
3.2 Батиметрия и входные метеофайлы.....	64
3.3 Начальные условия.....	67
3.4 Граничные условия.....	68
4 Результаты моделирования.....	71
ВЫВОД.....	87
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	89
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	91
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	99

СОКРАЩЕНИЯ

- ААНИИ - Арктический и антарктический научно-исследовательский институт;
- АДС - автономная донная станция;

ВВЕДЕНИЕ

Главными целями государственной политики Российской Федерации в Арктике в сфере социально-экономического развития является расширение ресурсной базы Арктической зоны Российской Федерации, способной в значительной степени обеспечить потребности России в углеводородных ресурсах, водных биологических ресурсах и других видах стратегического сырья. А одним из стратегических приоритетов государственной политики Российской Федерации в Арктике является содействие в организации и эффективном использовании транзитных и кроссполярных воздушных маршрутов в Арктике, а также в использовании Северного морского пути для международного судоходства в рамках юрисдикции Российской Федерации и в соответствии с международными договорами Российской Федерации.

Одним из грандиозных проектов в данной области является строительство на участке «п. Тамбей – п. Сабетта», расположенного в северной части Обской губы, завода по производству сжиженного природного газа, аэропорта для приема самолетов любого типа и порта для обеспечения перевалки углеводородного сырья и поставок природного газа, нефти и газового конденсата морским транспортом в страны Западной Европы, Северной и Южной Америки и страны Азиатско-Тихоокеанского региона.

В связи с освоением этого участка с 2011 года проводятся обширные исследовательские работы, организуются регулярные экспедиции. Одной из главных проблем является строительство морского подходного канала через подводный бар Дровяной, который располагается на месте расширения устьевое взморья реки Оби.

Так же в недрах полуострова Ямал и шельфа Карского моря находится большое количество горючих полезных ископаемых. Одним из наиболее используемых участков является Каменомысское месторождение, которое находится в южной части акватории Обской губы между Мысами Каменный и Парусный Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа РФ. Так же

не менее важным является Салмановское месторождение которое находится в северной части Гыданского полуострова и частично в акватории Обской губы на территории Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа РФ.

Таким образом, всё вышеизложенное является основанием для проведения исследований, направленных на сбор и анализ информации гидрометеорологических характеристиках района.

Для того, чтобы технически правильно строить гидротехнические сооружения, платформы, добывающие углеводородное сырье и т.д., необходимо обладать полноценными и информативными данными об гидрологическом и гидродинамическом режиме исследуемой акватории. Данный вопрос можно решить с помощью моделирования гидродинамических процессов в губе.

В связи с этим целью данной работы является адаптация гидродинамической модели Delft3D на акваторию Обской губы и последующее моделирование гидродинамического режима в выбранном районе для дальнейшего представления пространственно-временной изменчивости.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

- Установка гидродинамической модели Delft3D и проверка ее работоспособности,
- Построение расчетной сетки,
- Подготовка исходных данных по батиметрии, скорости и направлению ветра, давлению и температуре воздуха, облачности и влажности воздуха,
- Интерполяция батиметрии на расчетную сетку,
- Составление входных метеорологических файлов,
- Подготовка файлов с начальными и граничными условиями
- Составление общего входного файла со всеми значениями характеристик, которые необходимы для удачного расчета,

- Запуск модели, входе которого рассчитываются гидродинамические характеристики,
- Описание и сравнение полученных значений с натурными данными.

1 Описание области исследования

Расчетная область включает в себя Обскую губу, которая является главной целью исследования, а также часть Тазовской губы и Карское море.

1.1 Географическое описание

Карское море является окраинным морем Северного Ледовитого океана. Расположено между побережьем Западно-Сибирской равнины, островами Новая Земля, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля ($66 - 80^\circ$ с. ш., $54 - 103^\circ$ в.д.) (см. рис. 1.1). Площадь моря составляет 883 тыс. км², объем вод – 112 тыс. км³. Наибольшая протяженность моря с юго-запада на северо-восток – около 1500 км, ширина (в северной части) – до 800 км.



Рисунок 1.1 – Географическое положение Карского моря, Обской и Тазовской губы

Береговая линия моря достаточно изрезана, образуя несколько довольно больших заливов. Основные заливы – Енисейский, Пясинский и Таймырский, а также Байдарацкая, Обская и Тазовская губа. Крупнейшие реки, впадающие в Карское море, - Енисей, Обь, Пясина, Кара, - имеют годовой сток около 1300 км³.

Карское море расположено в пределах материковой отмели, поэтому около 40% его площади занимают глубины менее 50 метров и лишь 2% - более 500 метров (см. рис. 1.2). Вдоль восточных берегов Новой Земли вытянута Новоземельская впадина глубиной 200 – 418 метров. На северо-западе, в районе желоба Св. Анны вдоль восточного побережья Земли Франца-Иосифа, глубины достигают 620 метров, на северо-востоке, в районе желоба Воронина вдоль западного побережья Северной Земли, - 450 метров. Между желобами находится Центральная Карская подводная возвышенность (глубины менее 50 метров), на которой расположены острова Уединения, Визе и Ушакова.

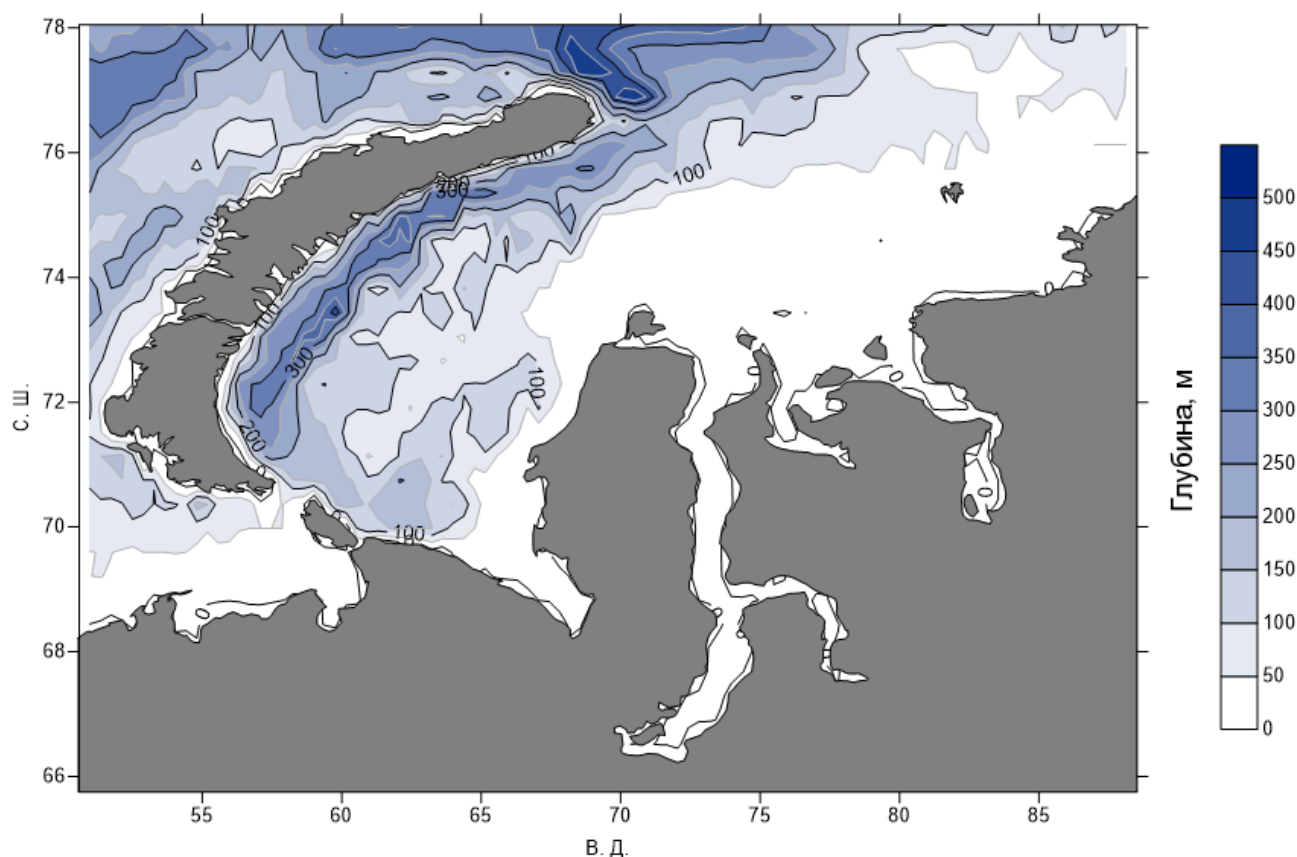


Рисунок 1.2 – Значения глубин в Карском море, Обской и Тазовской губе

Обская губа является эстуарием реки Обь, находится между полуостровом Гыданский и Ямал. Она представляет собой крупнейший залив Карского моря. В восточной части Обской губы находится Тазовская губа, в нее же впадает река Таз. Вся губа находится вдоль меридиана 73°Е. На севере ее территория заканчивается между мысом Шайтанов и островом Шокальского, а на юге между мысом Ям-Сале и Жертов (см. рис. 1.1). [8]

Длина Обской губы составляет примерно 800 километров, а протяженность каждого берега около 1000 километров. Ширина ее варьируется от 30 километров в самом узком месте, до 90 километров в самом широком. Наибольшая ширина ее между мысом Шайтанов и островом Шокальского и наименьшая ширина губы между мысом Каменный и мысом Парусиный. Площадь воды составляет 55.5 тыс. км², а объем около 445 км³. В самой Обской губе глубины небольшие, колеблются от 3-6 в южной части до 20-25 метров в северной (см. рис. 1.3). Так же имеется большое количество прибрежных мелководий. [7]

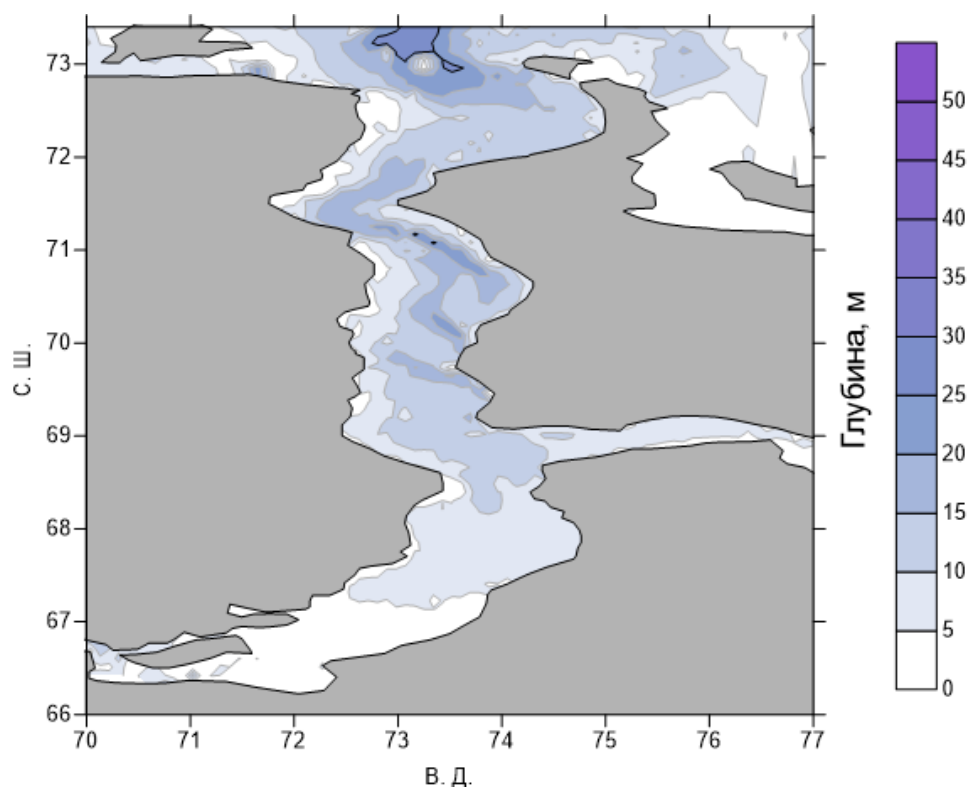


Рисунок 1.3 – Значения глубин в Обской губе

Вследствие своей протяженности от дельты реки Оби до границы с морской акваторией Обская губа имеет сложный, неравномерный донный рельеф, банки и бары встречаются неоднократно. Берега Обской губы сложены многолетнемерзлыми, льдистыми, песчано-глинистыми отложениями. Около 75% длины береговой линии занимают термоабразионные и абразионно-аккумулятивные берега. Он представляет собой последовательное чередование относительно прямолинейных участков и выпуклостей берегового контура, образованных приустьевыми дельтами впадающих в губу тундровых рек. В устье рек берега характеризуются проявлением термоабразии. Южнее участков размыва образуются небольшие косы, отчленяющие небольшие лагуны в своих тыловых частях

В губу впадают река Обь с южной стороны, Надым и Ныда с юго-восточной, а также небольшие реки Яда, Оя, Зеленая и другие с западной стороны.

В устьевой части река Обь образует дельту площадью более 4 тысяч километров. Там же река делится на два больших рукава: Надымская Обь и Хаманельская Обь. Оба рукава соединены друг с другом многочисленными протоками.

1.2 Термохалийные особенности

Климат Карского моря определяется его географическим положением: оно расположено к северу от полярного круга и находится под непосредственным влиянием Северного Ледовитого океана. Карское море – одно из самых холодных морей России: его средняя температура воздуха в январе колеблется от -20 до -28 °С, в июле – от +1 до +6 °С., температура воды поднимается выше 0°С только вблизи устьев рек летом. Часто наблюдаются туманы и штормы.

Ветровой режим Карского моря имеет муссонный характер. В зимний период преобладают ветры с южной составляющей, летом – с северной. В переходные сезоны устойчивость потоков уменьшается, причем в сентябре заметно увеличивается повторяемость ветров, характерных для зимних условий, а в октябре ветры зимнего типа уже являются преобладающими. Число дней со штормами составляет около 65 – 90 за год. В среднем возможно 4 – 8 дней за год со штормом за месяц. В отдельные годы число дней со штормом может отклониться от среднего в 1.5 – 2 раза. Скорости ветра во время штормов могут достигать 30 – 35 м/с.

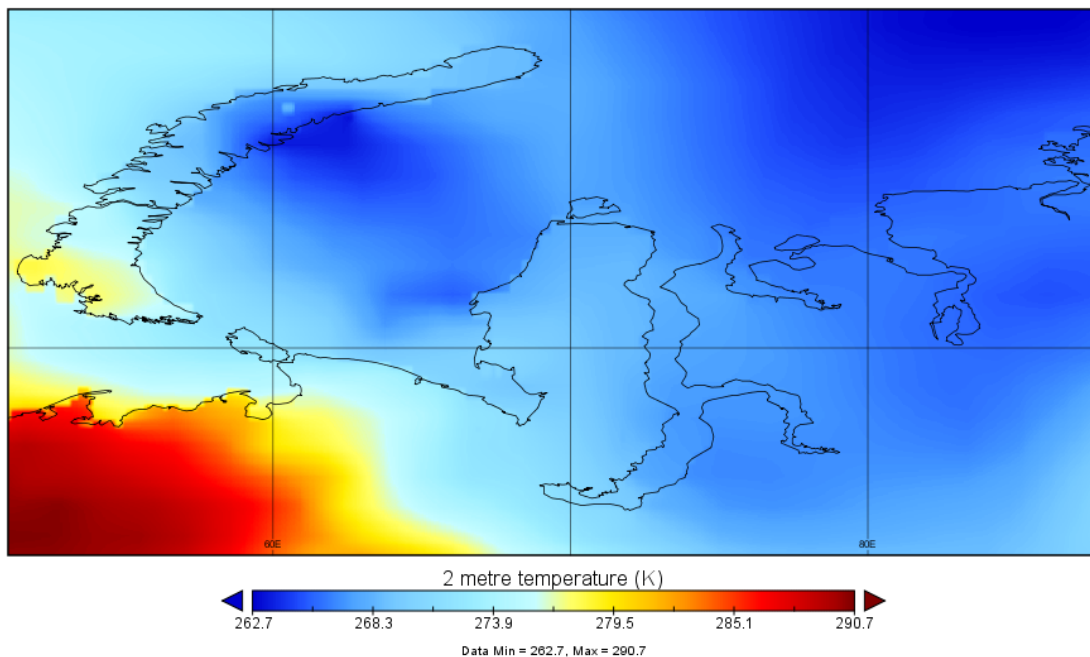
С октября по июнь море покрыто льдами. Таяние льдов начинается с конца мая – начала июня и происходит вначале в устьях рек, а затем в открытой части моря. К концу октября море замерзает полностью. Таким образом, навигационный период в Карском море в умеренную зиму длится с июля по начало октября.

С соседними морями – Баренцевым и Лаптевых – Карское море сообщается через проливы, которые большую часть года забиты льдами, что затрудняет водообмен между ними. Для расчетов это обстоятельство позволяет считать море замкнутым.

Верхний слой Карского моря распресняется речными стоками и летним таянием льдов. Соленость вблизи устьев Оби и Енисея равна примерно 10 – 12 промилле. У мыса Желания она возрастает до 30 промилле, а у Земли Франца-Иосифа до 34. В юго-западной части соленость воды в поверхностном слое варьируется от 20 до 25 промилле и повышается к южным проливам до 31. [9]

На рисунке 2.4 – 2.6 можно увидеть среднюю температуру воздуха на высоте 2 метра от поверхности в мае, июне, июле, августе и сентябре 2016 года.

2 metre temperature



2 metre temperature

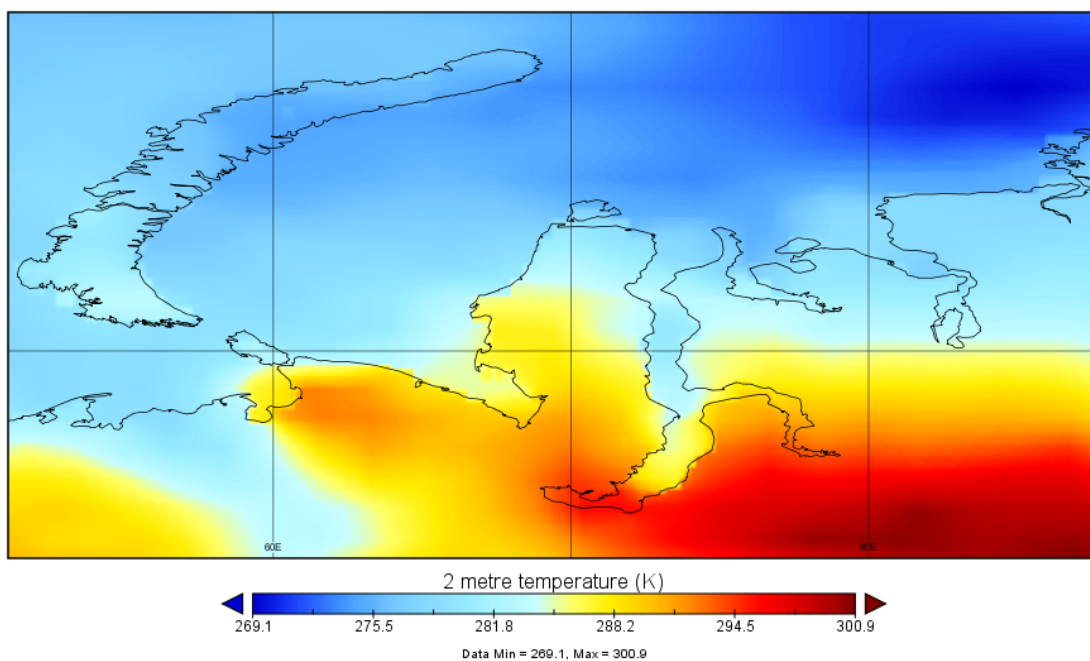
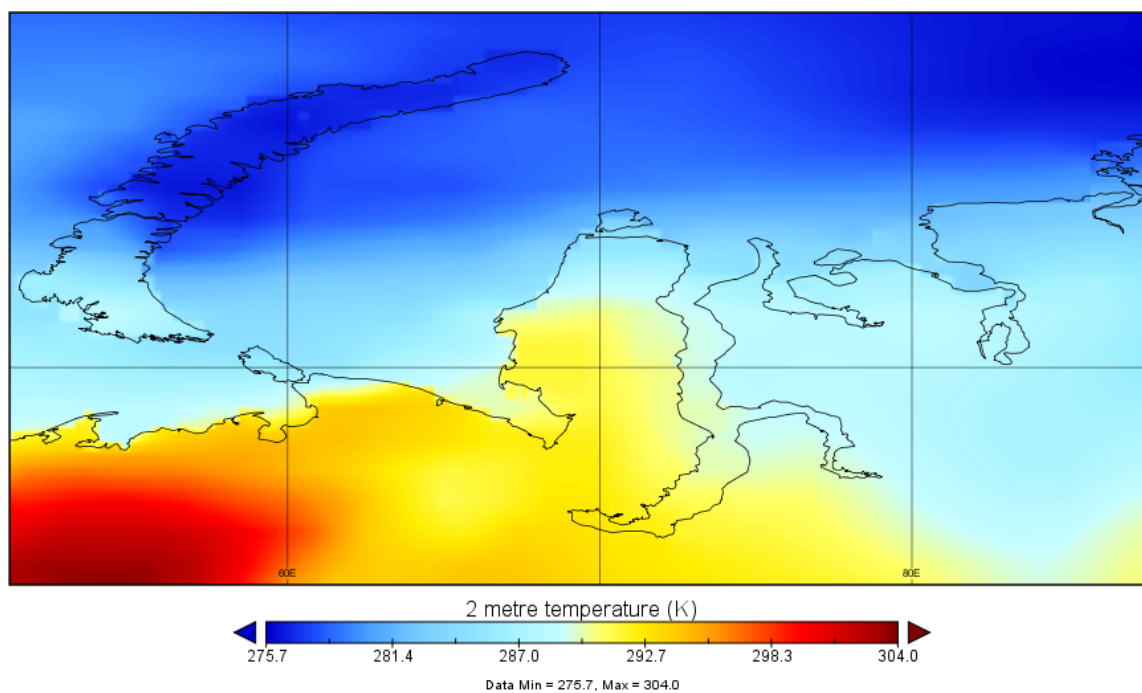


Рисунок 1.4 – Температура воздуха в мае и июне 2016 года

2 metre temperature



2 metre temperature

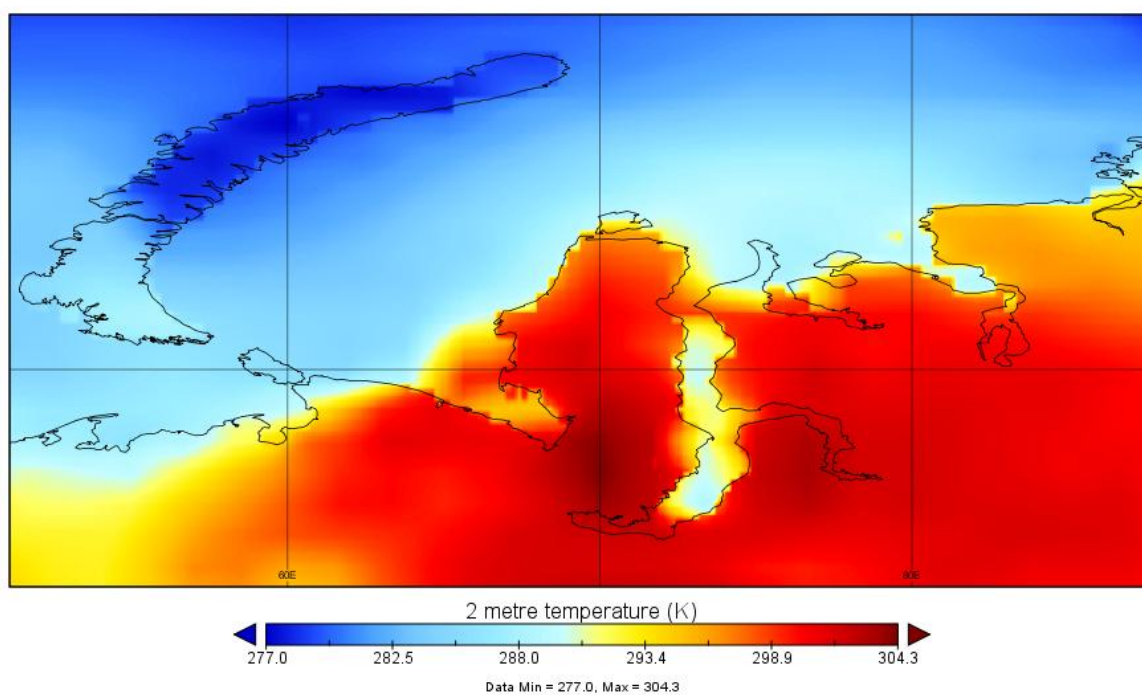


Рисунок 1.5 – Температура воздуха в июле и августе 2016 года

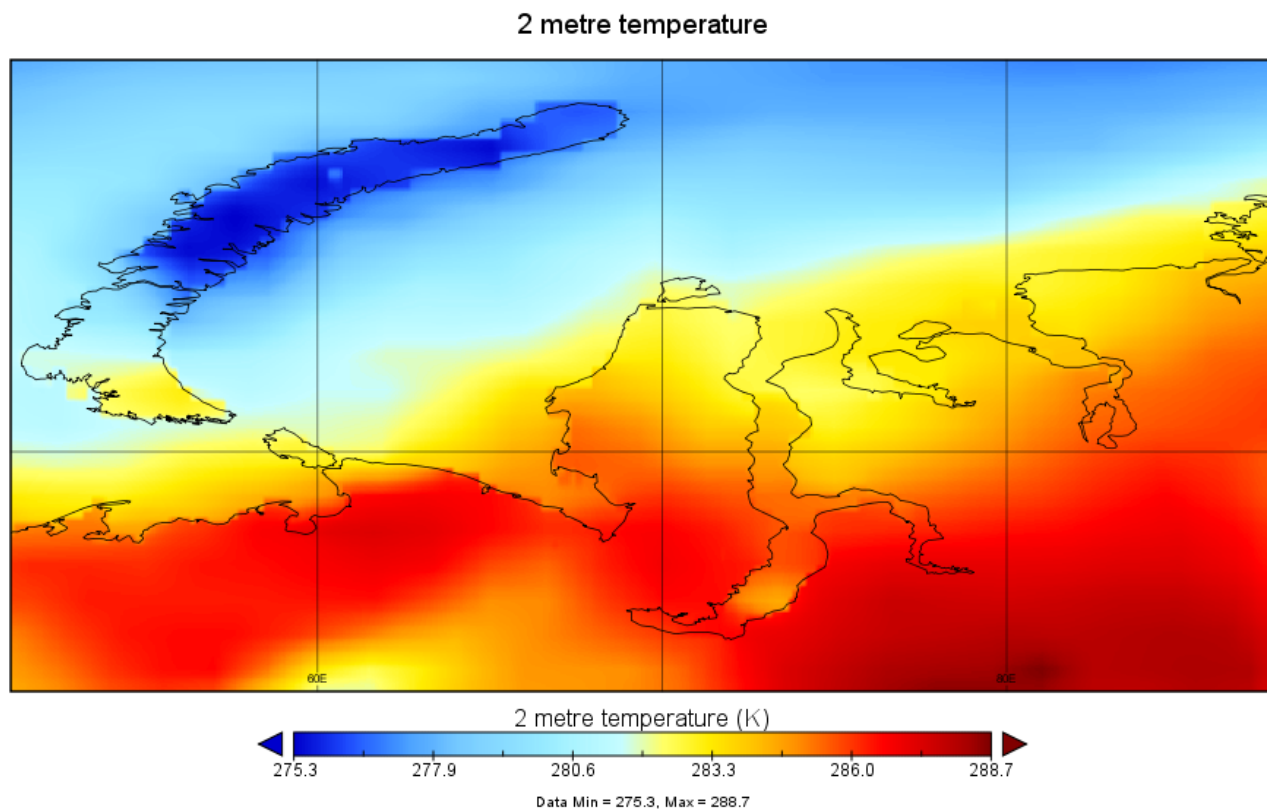


Рисунок 1.6 – Температура воздуха в сентябре 2016 года

Обская губа охватывает два климатических пояса: к субарктическому климатическому поясу, а северная к арктическому. Вся западно-сибирская низменность отличается континентальностью климата. С продвижением к Карскому морю эта континентальность несколько ослабевает. Смягчающее влияние здесь оказывает море, которое обладает большим запасом тепла, и в зимнее время частично отдает его в атмосферу.

Среднегодовая температура воздуха с продвижением от моря к устью реки Обь увеличивается, а среднегодовая температура воздуха в средней части губы и на севере мало различаются. С юга на север уменьшается количество теплых дней и увеличивается количество дней мороза. С удалением от моря максимальная температура повышается, а минимальная понижается. Это связано с резко континентальным климатом Сибирской низменности, и смягчающим воздействием циклонов над морской акваторией. Ряды максимальных температур и среднего квадратического отклонения имеют

практически нулевой линейный тренд, тогда как ряды отрицательных температур – заметный положительный тренд. [4]

Устойчивый плавающий лед появляется осенью в районе от Мыса Поруй до поселка Тамбей. В среднем это происходит в конце первой декады октября (с 07.IX по 27.X). Продолжительность ледового периода в Обской губе в районе поселка Сабетта и окружающей акватории составляет приблизительно 290 дней в год или максимально 322.

В первой половине ноября северная часть Обской губы обычно покрывается новым льдом толщиной до 30 см. Лед постоянно движется под действием ветровой нагрузки, течений, приливов, которые обуславливают образование торосов и торосистого льда нерегулярного характера. К этому времени вдоль побережья обычно образуется припайный лед. [17]

Обская губа представляет собой явно выраженный мелководной бароклинный эстуарий. Вертикальные градиенты солености могут достигать 15‰/1 м (или 15 частей на тысячу / 1 м). Горизонтальные градиенты солености и градиенты вдоль и поперек губы достигают 1‰/1 км (или 1 часть на тысячу/ 1 км).

Межсезонная изменчивость комплексной характеристики «соленость-температура-глубина воды» крайне важна. В июне - объем речного стока значительно увеличивается; солоноватая вода разбавляется пресной водой в результате таяния льда под воздействием солнечной радиации.

В августе - граница пресной воды ($<0.5\%$) расположена в зонах с широтами $71^{\circ}30'$ - $72^{\circ}10'$ N, то есть между поселком Сабетта и Морским Каналом. Летом соленость в придонном слое на этой границе ($73^{\circ}00'$ N северной широты) достигает 30-32‰. Соленость в поверхностном слое варьируется от 4-5 до 15-18‰ или даже может опускаться ниже до диапазона от 1-4‰. Между водными слоями существует слабый ограниченный обмен. Пикноклин (область быстрого изменения плотности) формирует барьер для вертикального водного обмена. В течение лета (июль – начало октября), характеристика «соленость-температура-глубина» имеет высокую

пространственную и временную изменчивость из-за влияния атмосферных процессов, потоков и резкого сокращения речного стока. Во время этого периода (летнего) значения комплексной характеристики «температура-глубина-солёность» плавно изменяется в соответствии с летним режимом, а граница пресной воды постепенно смещается на юг.

Зимой граница пресной воды приблизительно лежит в зоне с широтами $69^{\circ}30' - 70^{\circ}30'N$. На севере Обской губы мы наблюдаем квазиоднородное распределение термохалинных характеристик в вертикальном направлении, благодаря конвекционному обороту потоков, интенсивным приливо-отливным явлениям и значительному ветровому нагону. [6]

Районы к югу от мелководной зоны практически полностью термохалинно разнородны, к северу же от мелководной зоны стратификация водных слоев сохраняется, но менее явно (см. рис. 1.8).

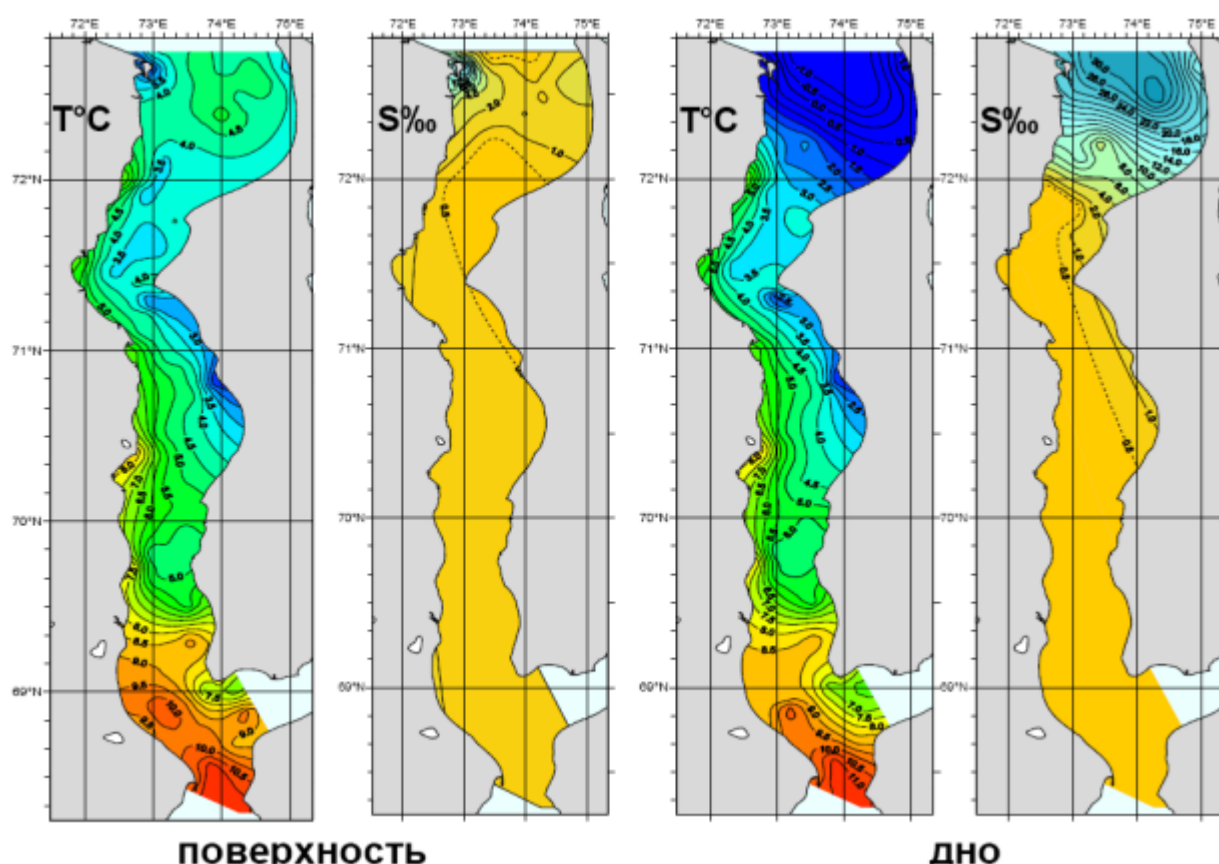


Рисунок 1.7 – Распределение температуры и солёности в течении лета (два левых рисунка: поверхностный слой, два правых рисунка: придонный слой)

В районе Сабетты в течение зимнего периода, соленость в придонном слое составляет 10-20‰. Однако, рисунок 1.8 показывает, что значения в 0.5-1‰ были зафиксированы осенью в районе порта. Известно, что интрузия (проникновение) соленых вод может в значительной мере варьироваться в межгодовом временном масштабе в зависимости от метеорологических условий.

Существование пресноводного фронта типично для исследуемого региона. В летний период этот фронт явно выражен и расположен к северу от поселка Сабетта; зимой стратификация водных масс видна менее отчетлива, и, следовательно, граница пресных вод смещается к югу. [5]

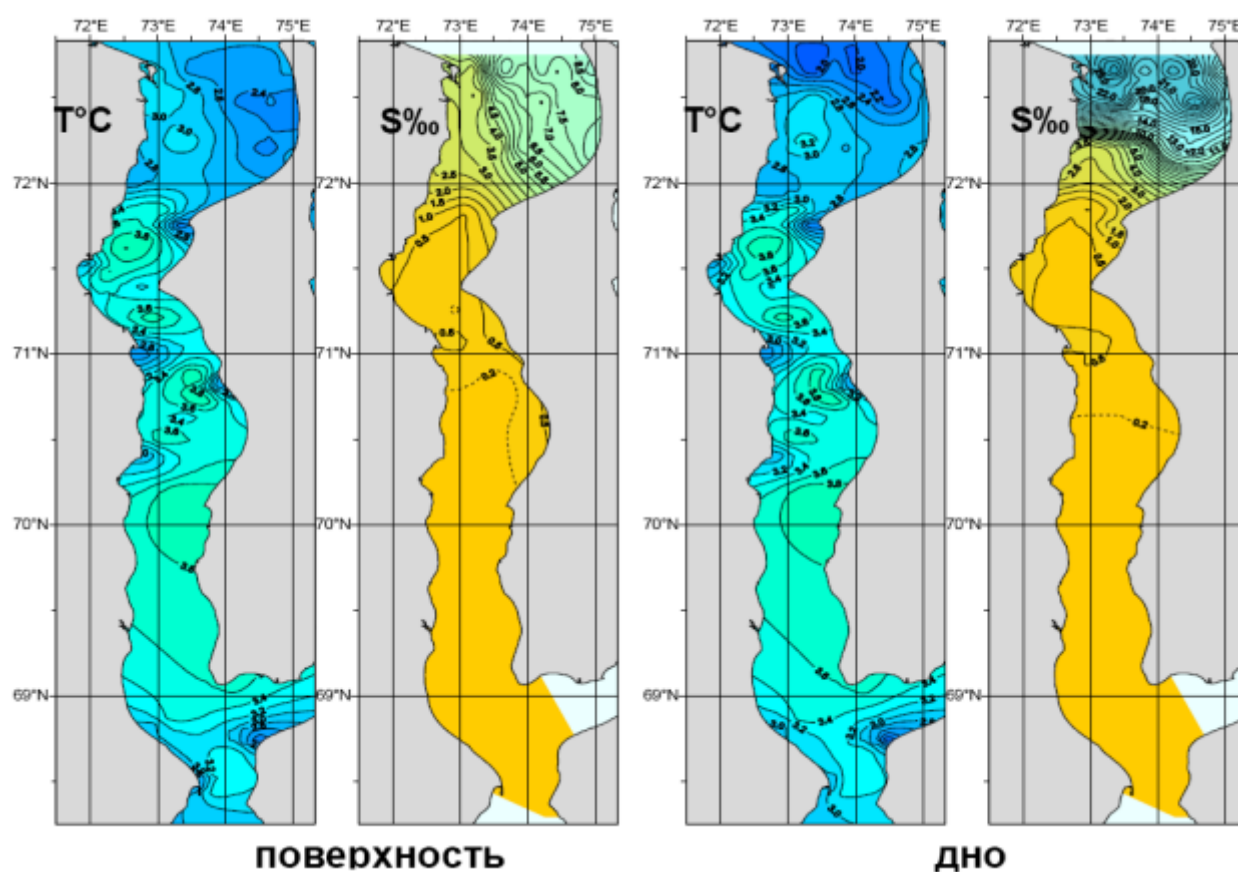


Рисунок 1.8 – Распределение температуры и солености в течение осени (два левых рисунка: поверхностный слой, два правых рисунка: придонный слой)

После того как установлено температурное распределение, уравнение состояния морской воды показывает, что влияние температуры на плотность

морской воды значительно меньше по сравнению с соленостью. Из представленного ниже уравнения 1.1 видно, что коэффициенты, стоящие перед температурой настолько малы, что можно ею пренебречь и оставить один параметр солености.[3]

$$\begin{aligned}\rho_0(T) &= 999.842594 + 6.793952 \cdot 10^{-2} \cdot T - 9.095290 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + \\ &\quad 1.001685 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 \\ &\quad - 1.120083 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 6.536332 \cdot 10^{-9} \cdot T^5 \\ A(T) &= 8.24493 \cdot 10^{-1} - 4.0899 \cdot 10^{-3} \cdot T + 7.6438 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 8.2467 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 \quad (1.1) \\ &\quad + 5.3875 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 \\ B(T) &= -5.72466 \cdot 10^{-3} + 1.0227 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1.6546 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \\ C &= 4.8314 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

Величина повышения температуры влияет на плотность значительно меньше, чем величина повышения солености. При нормальных условиях, эти соотношения приблизительно равны 1 кг/м³ на 4 °C и 1 кг/м³ на 1,25 промилле. Кроме того, эластичность плотности по температуре снижается при уменьшении фоновой температуры. Поэтому в условиях субполярного климата для определения водного движения (оценка клина солености) тепловое рассеивание не является важным фактором.

Рисунок 1.9 представляет собой многолетнее вертикальное распределение значений солености и температуры вдоль северной части Обской губы. Отдел Океанологии Научно-исследовательского института Арктики и Антарктики (ААНИИ) использовал 874 измерительных станции для составления этой иллюстрации. Термохалинные параметры: соленость (верхняя картинка) и температура (третья сверху) очерчены одним и тем же стратификационным контуром и позволяют увидеть зависимость в распределении плотности и солености по вертикали. Иными словами, холодная соленая морская вода по причине более высокой плотности располагается в придонных слоях, а теплая

пресная вода речного стока с меньшей плотностью остается в поверхностных слоях.

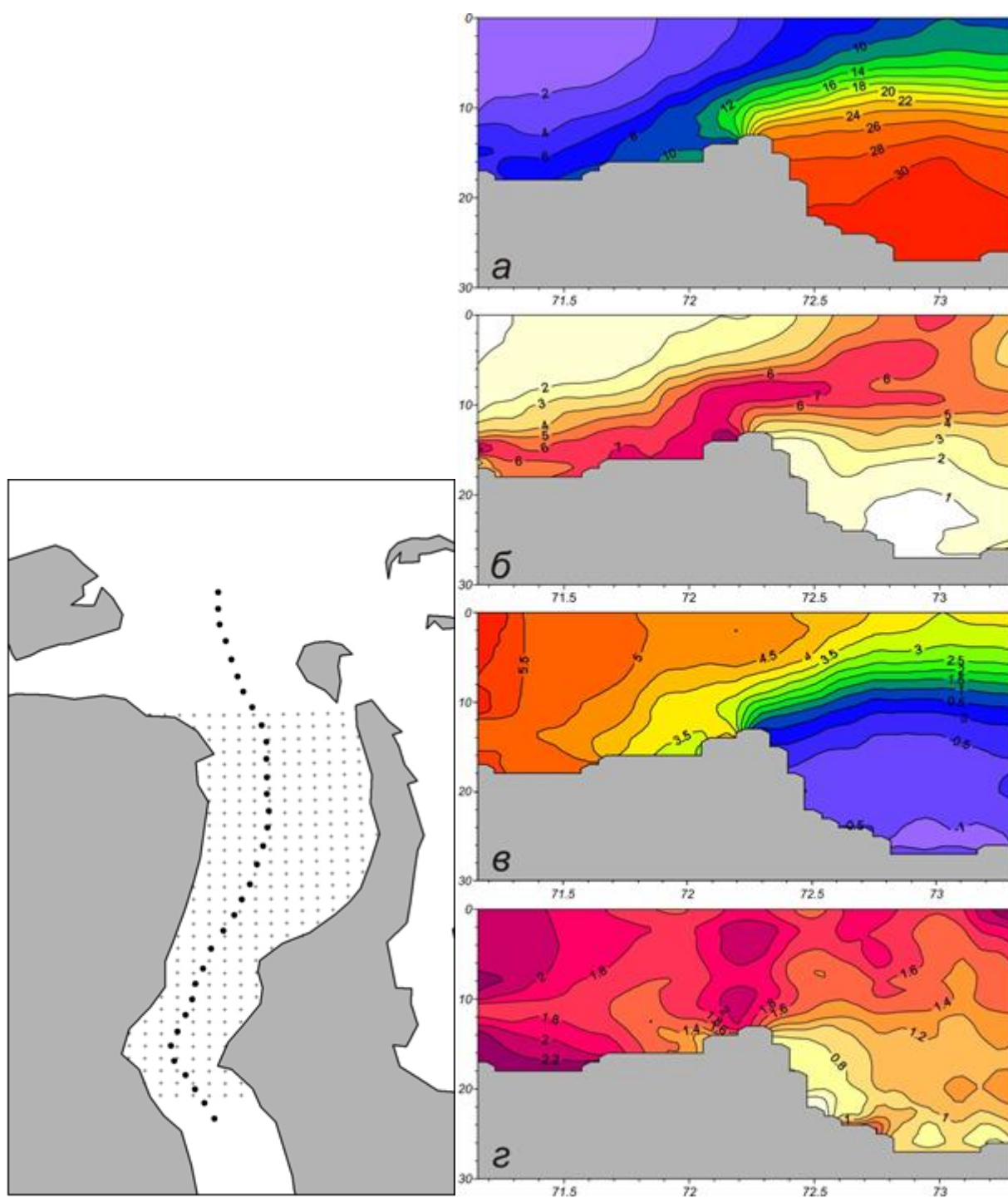


Рисунок 1.9 – Среднее многолетнее вертикальное распределение солености (а), температуры (б) и их стандартные отклонения (в, г) вдоль Обской губы во время безлёдного периода

1.3 Гидродинамические особенности

В Карском море в формировании постоянных поверхностных течений большую роль играют речной сток и водообмен с близлежащими водными бассейнами, в особенности с Баренцевым морем (см. рис. 1.10).

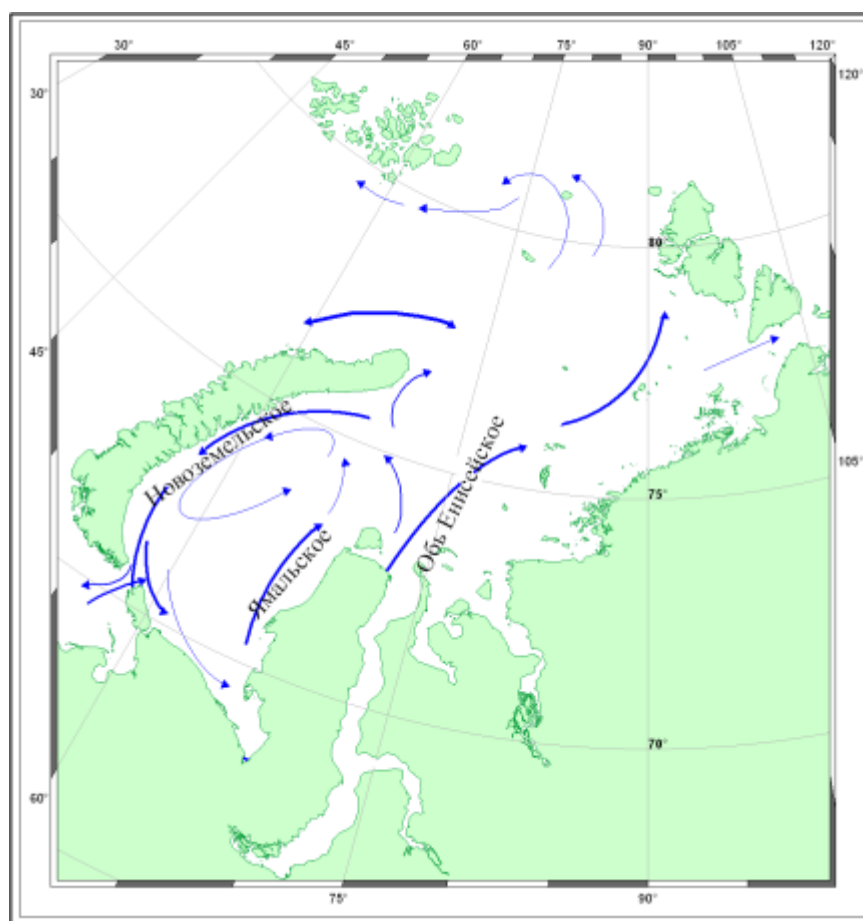


Рисунок 1.10 – Течения в поверхностном слое Карского моря

В следствии стоковых течений и притоков из близлежащих морей воды Карского моря имеют явно выраженный круговорот против часовой стрелки. На юге круговорот образуется западной ветвью Обь-Енисейского течения и притоком вод из Баренцева моря, которые поступают через пролив Карские ворота и Югорский шар. Течение Обь-Енисей во время движения на север разделяется на три – западное, северное и восточное. Западное, доходя до северо-восточного побережья Новой Земли, так же разделяется на два, одно из

которых движется на северо-восток, а другое, именуемое Новоземельским течением, на юг. Так же имеется поток, который направляется в сторону берега Ямала, далее идет на север до слияния с западной ветвью Обь-Енисейского течения, замыкая таким образом юго- западный круговорот. Северная часть течения в Обь-енисейских водах имеет направление в сторону северо-востока. Восточная же часть замыкает северо-восточный круговорот.

Скорость постоянных течений в Карском море варьируется в пределах 5 – 15 см/с. При совпадении по направлению с ветровыми течениями, скорость повышается до 70 – 90 см/с. [1]

В Обской губе течения состоят из квазипостоянных, приливных и ветровых течений. Первые имеют направление с юга на север, образуются в следствии стока рек. Средняя скорость течений в Южной части Обской губы составляет 20—25 см/с, а на момент достижения периода половодья в мае - июле 30 см/с. В северной части, в районе поселка Сабетта, скорость данных течений падает до 10 см/с. Из-за придонных особенностей могут возникать компенсационные течения вдоль побережья, направлены они в другую сторону, против основного стокового течения. Придонные течения в северной части губы могут иметь направление в сторону юга, то есть происходит заток морской воды. Дальность залива зависит от расхода впадающих рек.

Дрейфовые течения в Обской губе имеют ярко выраженный характер. Скорость их и направления связаны с направлением и скоростью ветра. В летний период, в июне - августе, преобладают ветры с северной стороны, особенно северные и северо-западные, со средними скоростями 5—7 м/с. В сентябре и октябре преобладают западные ветры. Наиболее волноопасные ситуации в Обской губе возникают при ветрах, идущих вдоль ее оси, соответственно южных и северных.

Приливы в Обской губе имеют в основном полусуточный характер. Средняя величина изменения уровня под воздействием приливов составляет 20—50 см в зависимости от расстояния от выхода Обской губы в Карское море.

Во время штиля в момент прилива суммарные течения направлены на юг, продолжаются около 4 часов со скоростью до 35 см/с. Во время отлива суммарные течения направлены на север, причем в сизигийный отлив эти течения продолжаются около 6 часов, а в квадратурный — 7 часов. Скорость их составляет 36—51 и 20—36 см/с соответственно.

Как известно, в придонном слое распространяются солёные воды Карского моря, то есть течения имеют противоположное направление относительно основного потока реки Оби. Так в январе отмечается наиболее симметричная картина, как по интенсивности, и по количеству течений. С февраля по апрель и в верхних и в придонных слоях преобладают течения юго-восточного направления. В мае начинает постепенно выравниваться количество течений юго-восточных и северо-западных направлений. Так же снижается интенсивность придонных течений. Это связано с началом половодья, когда интенсивный поток не дает морским водам распространяться на юг. В июне картина течений кардинально отличается от периода февраль-апрель, так как преобладают течения север – северо-западного направления. С июля картина начинает изменяться в обратную сторону и в августе наблюдается симметричное расположение течений во всех слоях, начинается межень. А с октября по декабрь на фоне симметричного расположения течений в верхних слоях в придонных слоях большее количество течений направлено на северо-запад. [2]

2 Описание вычислительной модели

Для расчета полей температуры, солености, давления, уровня воды, скоростей и направления течений могут быть использованы гидродинамические модели. В данной работе была выбрана модель, разработанная в Дельфтском университете – Delft3D.

Компания Deltares разработала уникальную, полностью интегрированную среду моделирования для междисциплинарного подхода и трехмерных вычислений для прибрежных, речных, речных и устьевых областях. Она может выполнять численное моделирование течений, переноса примесей, волн, качества воды, морфологических изменений и экологии. Структура модели Delft3D состоит из нескольких модулей, которыми можно управлять из одной интерфейсной оболочки и которые взаимодействуют друг с другом. [10]

В модели Delft3D имеется возможность переключения между двухмерным (осредненным по глубине) и трехмерным режимом. Данная функция позволяет настроить и исследовать поведение модели в двухмерном режиме, прежде чем приступить к трехмерному.

Модель Delft3D может быть применима в следующих областях:

- Приливные и ветровые потоки, плотностные градиенты и волновые индуцированные потоки;
- Распространение направленных коротких волн над неровной поверхностью дна, включая взаимодействие волновых течений;
- Адвекция и дисперсия стоков рек;
- Морфодинамические вычисления;
- Перенос примеси, наносов и осадка;
- Феномен качество воды, включая экологическое моделирование, прогнозирование концентрации тяжелых металлов, взаимодействие с органическими и неорганическими взвешенными наносами, взаимодействие между водой и дном (например, потребление кислорода), цветение водорослей;
- отслеживание частиц, включая разлив нефти и так далее;

- Начальные и/или динамические (временные) двухмерные морфологические изменения, включая воздействие волн на перемешивание осадка и донных наносов. [12]

Модель Delft3D состоит из нескольких модулей (см. рис. 2.1), каждый из которых относится к конкретной интересующей области.

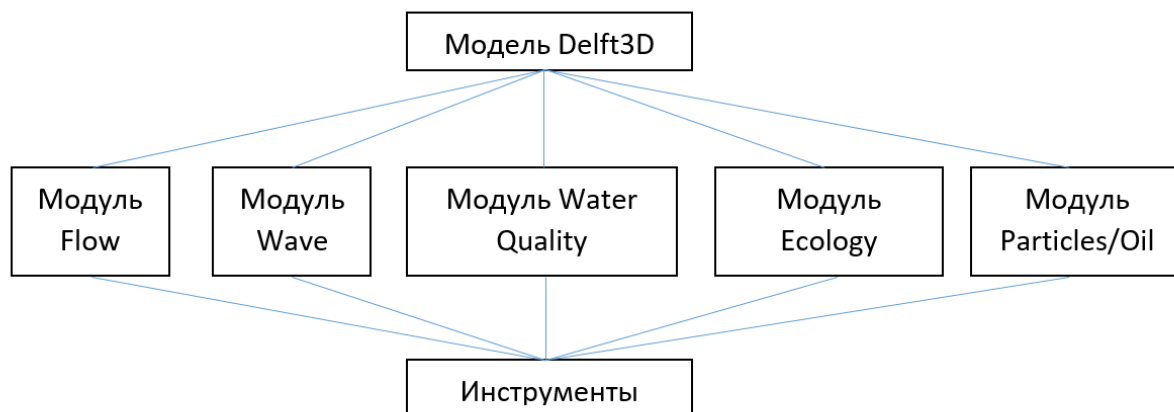


Рисунок 2.1 – Архитектура модели Delft3D

Все модули динамически сопряжены для обмена данными и результатами, которые необходимы для совместного расчета. Модуль Delft3d-FLOW отвечает за гидродинамику. С его помощью можно рассчитать скорость и направление течений, уровень воды, соленость и температуру воды, траекторию движения примесей в воде и так далее. В модуле Delft3D-WAVE происходит расчет коротковолнового распространения (совместно используя модель SWAN). D-Water Quality позволяет рассчитать общее качество воды, Delft3D-SED перенос донных отложений, а D-Waq PART моделирует перенос частиц и разлив нефти.

Так же в модели присутствуют инструменты для обработки исходных данных и результатов, генерации сетки, батиметрии, открытых границ, сооружений, препятствий и других входных файлов. Подпрограмма RGRFGRID позволяет сгенерировать расчетную сетку и все необходимые с ней файлы. С

помощью QUICKIN можно проинтерполировать значения глубин в узлы расчетной сетки, а в QUICKPLOT визуализировать полученные результаты.

Итак, для начала рассмотрим гидродинамический модуль Delft3D-FLOW. Он является многомерной гидродинамической программой симуляции, которая имеет возможность расчета нестационарного потока и явления переноса в следствии приливного и метеорологического воздействия на криволинейной граничной сетке. Трехмерный режим реализован с помощью двух методов, а именно сигма-координат по вертикали и метод постоянных вертикальных горизонтов (Z-координат) по всей исследуемой акватории. При использовании сигма-координат, рельеф дна представляется более плавным.

Модуль Delft3D-FLOW основан на уравнениях Навье-Стокса с применением аппроксимации мелкой воды. Уравнения решаются с помощью высокоточной стабильной процедуры решения. Поддерживаемые функции:

- Две координатные системы, такие как Картезианская и сферическая в горизонтальном направлении;
- Две системы сеток в горизонтальном направлении; граница, установленная сигма-сеткой и горизонтальный слой Z-сетки;
- Разложение области как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении;
- Генерация приливообразующих сил (доступно только для сетки в сферических координатах);
- Моделирование осушения и затопления межледниковых плоскостей (движущиеся границы);
- Градиенты плотности в следствии неравномерного распределения температуры и солености (потоки плотности);
- Расчет для двумерных горизонтальных крупномасштабных вихревых расчетов коэффициентов горизонтального обмена в следствии циркуляций (концепция Смагоринского);
- турбулентности для учета вертикальной турбулентной вязкости и коэффициента диффузии на основе концепции вихревой вязкости;

- Возможность выбора типа замыкания турбулентности (k-ε, k-L или алгебраический и постоянный коэффициент);
- Напряжение, создаваемое турбулентными потоками на дне на основе формулы Чейзи, Маннинга или Уайт-Коулбрука;
- Автоматическое преобразование двумерного коэффициента придонного напряжения в трехмерный;
- Напряжения ветра на поверхности воды, моделируемые квадратичным законом трения;
- Изменение направления и скорости ветра, а также барометрического давления по пространству (на расчетной или отдельной сетке), включая гидростатическую поправку давления на открытых границах;
- Моделирование теплового стока, сброса сточных вод и забора охлажденных вод в любом месте и на любой глубине в вычислительном поле (адвекционно-диффузный модуль);
- Моделирование переноса осадка (ил или песок), включая составы для эрозии и осаждения;
- Моделирование таких препятствий, как водосливы, затворы, пористые плиты и плавающие конструкции;
- Взаимодействие волнового потока с учетом распределения по вертикали;
- Множество опций для граничных условий, которые учитывают уровень воды, скорость течения, сток и так далее;
- Несколько вариантов определения граничных условий в виде временных рядов, гармонических и астрономических составляющих;

Также перечислим области применения данного модуля:

- Приливные и ветровые течения (т.е. штормовой нагон);
- Стратифицированные и плотностные течения;
- Моделирование течения в реках;
- Моделирование в глубоких озерах и водохранилищах;
- Температурная стратификация в озерах, морях и водоемах;

- Перенос растворенного вещества и загрязняющих веществ;
- Течения, вызванные волновым воздействием;
- Негидростатические течения.

Для моделирования эволюции ветровых волн в прибрежных участках, эстуариях, приливных территориях, озерах и т.д. используется модель ветрового волнения третьего поколения SWAN –Simulating Waves Nearshore, которая интегрирована в модуль Delft3D-WAVE. Он может работать в комбинации с модулем Delft3D-FLOW, используя параллельный расчет. [12]

2.1 Ключевые особенности

Модуль Delft3D-FLOW, основанная на методе конечных разностей, имитирует двумерные (осреднённые по глубине) или трехмерные нестационарные течения и явления переноса, возникающие в следствии приливных и метеорологических явлений, а также неоднородности полей температуры и солености. Модель потока может использоваться для прогнозирования потоков в морях, прибрежных районах, эстуариях, лагунах, реках и озерах.

В системе численного гидродинамического моделирования Delft3d-FLOW решаются нестационарные уравнения мелкой воды в двумерном или трехмерном пространстве. Система уравнений состоит из горизонтальных уравнений движения, уравнения неразрывности и уравнений переноса для консервативных составляющих. Уравнения формируются на ортогональной криволинейной или равноудаленной расчетной сетке в метрических или сферических координатах.

Поток генерируется приливными силами, напряжением ветра на свободной поверхности, градиентами давления (баротропными) и плотности (бароклинными). Так же включены уравнения расхода воды.

Модуль Delft3D-FLOW включает в себя математические формулировки, которые учитывают следующие физические параметры:

- Градиенты свободной поверхности (баротропная составляющая);
- Эффект вращения земли (коэффициент Кориолиса);
- Вода с переменной плотностью (уравнение состояния);
- Бароклинная составляющая;
- Перенос соли, тепла и других составляющих;
- Приливные силы на открытых границах;
- Изменение напряжения ветра на поверхности по пространству и времени;
- Изменение атмосферного давления на поверхности по времени и пространству;
- Сток вод;
- Теплообмен через свободную поверхность;
- Испарение и атмосферные осадки;
- Приливообразующие силы;
- Боковое напряжение на стенках;
- Вертикальный обмен импульсом в следствии внутренних волн;
- Влияние волн;
- Волновое напряжение и потоки масс;
- Потоки через гидравлические конструкции.

Уравнения вычисляются с помощью неявной конечно-разностной схемы на смещенной расчетной сетке с использованием метода переменных направлений. Конечно-разностная схема является безусловно устойчивой. Шаг по времени определяется с учетом условия Куранта-Фридриха-Леви. [12]

2.2 Уравнения гидродинамики и переносов, используемые в модели

Осредненное по глубине уравнение неразрывности было выведено путем интегрирования уравнения неразрывности для несжимаемой жидкости ($\nabla \cdot \vec{u} = 0$) по всей глубине с учетом кинематических граничных условий на поверхности воды и уровне дна, полученного из:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta}, \quad (2.1)$$

$$= (d + \zeta)Q$$

$$\begin{aligned} \zeta &= \lambda, \\ \eta &= \phi, \\ \sqrt{G_{\xi\xi}} &= R \cos \phi, \\ \sqrt{G_{\eta\eta}} &= R, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где R - радиус Земли (6378.137 км);
 λ - долгота;
 ϕ - широта;

вместе с осредненными по глубине компонентами скоростей U и V :

$$U = \int_{-1}^0 u d\sigma = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta u dz, \quad (2.3)$$

$$V = \int_{-1}^0 v d\sigma = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta v dz,$$

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}, \quad (2.4)$$

где z - вертикальная координата в физическом пространстве (см. рис. 2.2);
 ζ - высота свободной поверхности над плоскостью уровня моря (при $z = 0$);
 d - глубина ниже плоскости уровня моря;

H - общая глубина воды ($d + \zeta$);

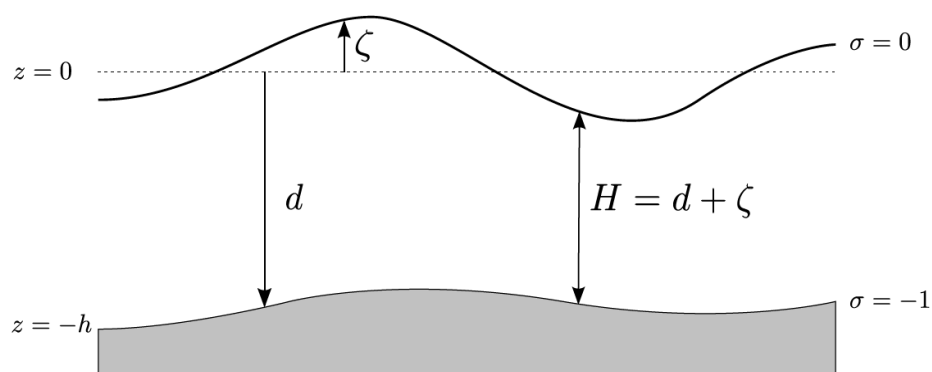


Рисунок 2.2 – Определение уровня воды (ζ), глубины (h) и общей глубины (H)

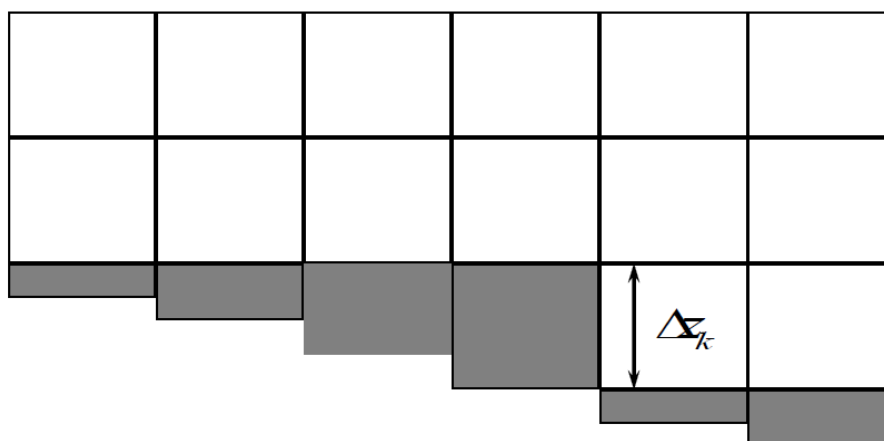


Рисунок 2.3 - Нерегулярное представление нижнего пограничного слоя в Z-модели

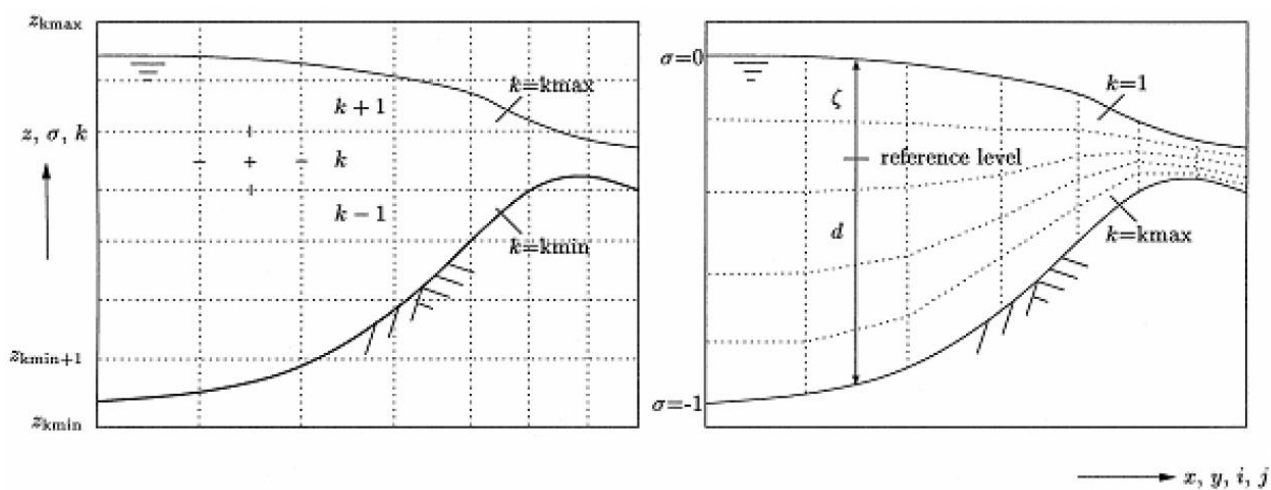


Рисунок 2.4 – Вертикальная расчетная сетка (слева в Z-координатах, справа в σ)

и Q , которое представляет вклад на единицу площади из-за сброса воды, осаднения или испарения:

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) dz + P - E, \quad (2.5)$$

где q_{in} и q_{out} - локальные источники и стоки вод на единицу объема [1/с];

P - источник осадков;

E - испарение.

Уравнения импульса в горизонтальном направлении определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) + M_\xi, \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ + \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fv \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) + M_\eta, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$= -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) + M_\eta, \quad (2.8)$$

$$\nu_V = \nu_{mol} + \max(\nu_{3D}, \nu_V^{back}),$$

$$\nu_{3D} = c'_\mu L \sqrt{k},$$

- где ν_V - коэффициент вертикальной вязкости;
- P_η и P_ξ - градиенты давления;
- F_η и F_ξ - дисбаланс горизонтальных напряжений Рейнольдса;
- M_η и M_ξ - вклады, связанные с внешними источниками или потоками импульса (внешние силы гидравлических структур, сброс или отвод воды, волны, напряжения и так далее);
- ν_{mol} - кинематическая вязкость воды;
- ν_V^{back} - горизонтальная турбулентная вязкость;
- c'_μ - константа, определяемая путем калибровки, полученная из эмпирической константы $c'_\mu = c_\mu^{1/4}$, $c_\mu = 0.09$;
- L - глубина перемешивания;
- k - турбулентная кинетическая энергия.

Горизонтальный коэффициент турбулентной вязкости $\nu_{H\text{намного}}$ больше, чем вертикальный коэффициент турбулентной вязкости ν_V . Силы дисбаланса горизонтальных напряжений Рейнольдса равны:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta}, \quad (2.9)$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta}. \quad (2.10)$$

Для мелкомасштабных течений, когда необходимо учитывать касательное напряжение:

$$\tau_{\xi\xi} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi}, \quad (2.11)$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = v_H \left\{ \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} \right\}, \quad (2.12)$$

$$\tau_{\eta\eta} = \frac{2v_H}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta}. \quad (2.13)$$

Вертикальная скорость w рассчитывается с помощью следующего уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial ((d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}} \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial ((d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} \\ + \frac{\partial w}{\partial z} = (d + \zeta)(q_{in} + q_{out} 0). \end{aligned} \quad (2.14)$$

На поверхности учитывается влияние осадков и испарения. Так же можно интерпретировать как скорость, связанную с движениями вверх или вниз. «Физические» вертикальные скорости в декартовой системе координат не участвуют в модельных уравнениях. Их вычисление требуется только для последующей обработки.

По предположению о мелкой воде уравнение вертикального импульса сводится к уравнению гидростатического давления. Вертикальные ускорения из-за эффекта плавучести и из-за резких изменений рельефа дна не учитывается. Поэтому, получается следующее уравнение:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -g\rho H. \quad (2.15)$$

После интегрирования получаем:

$$P = P_{atm} + gH \int_z^0 \rho(\xi, \eta, z', t) dz'. \quad (2.16)$$

В случае неравномерного распределения плотности в акватории, локальная плотность связана со значениями температуры и солёности из уравнения состояния (см. ур-е 1.1). Для расчета горизонтальных градиентов давления используется правило Лейбница:

$$\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + g \frac{d + \zeta}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} \int_z^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \xi} \right) dz', \quad (2.17)$$

$$\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + g \frac{d + \zeta}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} \int_z^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \eta} \right) dz'. \quad (2.18)$$

Первым членом уравнения 2.12 и 2.13 представлен баротропный градиент давления, а вторым – бароклинный.

В данной модели перенос вещества и тепла моделируется путем решения уравнения аддитивной диффузии в трех координатных направлениях.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(d + \zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d + \zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d + \zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} \\ & + \frac{\partial wc}{\partial z} \\ & = \frac{d + \zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} \\ & + \frac{1}{d + \zeta} \frac{\partial}{\partial z} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \lambda_d (d + \zeta) c + S, \end{aligned} \quad (2.19)$$

где D_H - горизонтальный коэффициент диффузии;
 D_V - вертикальный коэффициент диффузии;
 λ_d - процесс распад первого порядка;
 S - условие источника и приемника на единицу площади;
 q_{in} - расход;

q_{out} - изъятие потока;

Q_{tot} - обмен тепла через свободную поверхность.

$$S = (d + \zeta)(q_{in} C_{in} - q_{out} c) + Q_{tot}. \quad (2.20)$$

2.3 Граничные условия

В модели Delft3D-FLOW предполагается, что поток на открытых границах является субкритическим, а это означает, что величина потока меньше скорости волны. Под этим потоком понимают, что число Фруда, определенное как:

$$F_r = \frac{|U|}{\sqrt{gH}}, \quad (2.21)$$

меньше, чем единица. В вертикальном направлении уравнения импульса параболичны. Профиль вертикальной скорости определяется вертикальной турбулентной вязкостью и граничными условиями на слое (напряжением слоя) и свободной поверхностью (напряжением ветра).

На свободной поверхности граничные условия для уравнения импульса представлены как:

$$\frac{v_v}{H} \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{1}{\rho_0} |\vec{\tau}_s| \cos \theta, \quad (2.22)$$

$$\frac{v_v}{H} \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{1}{\rho_0} |\vec{\tau}_s| \sin \theta, \quad (2.23)$$

где θ - угол между вектором напряжением ветра и локальным направлением линии сетки η . Величина сдвига напряжения ветра определяется как:

$$|\vec{\tau}_s| = \rho_a C_d U_{10}^2, \quad (2.24)$$

где ρ_a - плотность воздуха;
 C_d - коэффициент ветрового сопротивления, зависящий от U_{10} ;
 U_{10}^2 - скорость ветра на высоте 10 метров над уровнем свободной поверхности.

Коэффициент ветрового сопротивления может зависеть от скорости ветра, что отражает увеличение шероховатости поверхности моря с увеличением скорости ветра.

Теперь немного об открытых границах. В природе волны могут их пересекать без препятствий и какого-либо отражения. На этих границах должен быть задан уровень воды, компоненты скоростей течений и значения термохалийных характеристик, чтобы получить корректную математическую начально-краевую задачу. Для границы притока также необходимо указать компонент тангенциальной скорости. В данной задаче предполагается, что поток нормален к открытой границе. Данные, необходимые для граничных условий, могут быть получены из натурных измерений, таблиц приливов или из результатов более крупной модели.

В данной модели выделяются следующие типы граничных условий (для простоты здесь приводится только описание для компоненты U):

- уровень воды: $\zeta = F_\zeta(t) + \delta_{atm}$;
- скорость (направленная по нормали): $U = F_U(t)$;
- расход: $Q = F_Q(t)$;
- граница Неймана: $\frac{\partial \zeta}{\partial \vec{n}} = f(t)$;
- инварианта Реймана: $U \pm \zeta \sqrt{\frac{g}{d}} = F_R(t)$.

В общем случае граничные условия задаются в ограниченном числе граничных точек. Для генерации граничных условий в промежуточных точках

вдоль границы используется линейная интерполяция. Она может генерировать физические потоки в области, близкой к открытой границе.

$$\delta_{atm} = \frac{p_{average} - p_{atm}}{\rho g}, \quad (2.25)$$

где $p_{average}$ - среднее давление;

p_{atm} - локальное атмосферное давление, полученное из метеомодуля;

ρ - плотность воды;

g - ускорение силы тяжести.

Стеллинг (1984)[11] добавил производную по времени инварианты Реймана к граничным условиям уровня воды и скорости, чтобы сделать границы менее отражающими для возмущений с собственной частотой модельной области.

$$\zeta + \alpha \frac{\partial}{\partial t} \{U \pm 2\sqrt{gH}\} = F_{\zeta}(t),$$

$$\alpha = T_d \sqrt{\frac{H}{g}}, \quad (2.26)$$

$$U + \alpha \frac{\partial}{\partial t} \{U \pm 2\sqrt{gH}\} = F_U(t), \quad (2.27)$$

$$\alpha = T_d$$

где (2.26) - граница уровня воды;

(2.27) - граница скорости;

α - коэффициент отражения.

T_d - это время, необходимое для того, чтобы свободная поверхностная волна перемещалась от левой границы к правой границе области модели. В

моделях океана и морей данный период имеет тот же порядок, что и период приливного воздействия.

Перемещение растворенных веществ, таких как соль, осаднения и тепло, описывается уравнением адвекции-диффузии. Горизонтальный перенос преобладает над адвекцией, а уравнение имеет гиперболический вид. При притоке требуется одно граничное условие и указывается концентрация. При оттоке не допускается граничное условие. Концентрация определяется чистой адвекцией из внутренней области:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{U}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial C}{\partial \xi} = 0. \quad (2.28)$$

Вертикальный диффузионный поток через свободную поверхность и слой равен нулю, за исключением теплового потока через свободную поверхность:

$$\left. \frac{D_V}{H} \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (2.29)$$

$$\left. \frac{D_V}{H} \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=H} = 0. \quad (2.30)$$

В качестве модели турбулентности была выбрана модель k-ε. В ней уравнения переноса должны быть решены как для турбулентной кинетической энергии k , так и для диссипации энергии ε . Затем длина смешивания L определяется следующим образом:

$$L = c_\mu^{1/4} \frac{k\sqrt{k}}{\varepsilon}, \quad (2.31)$$

где $c_\mu^{1/4}$ - эмпирическая константа, равная примерно 0.1925.

2.4 Модель тепла

Тепловое излучение, излучаемое солнцем, достигает Земли в виде электромагнитных волн с длиной волны в диапазоне от 0,15 до 4 мкм. В атмосфере излучение подвергается рассеянию, отражению и поглощению воздухом, облаками и пылью. В среднем ни атмосфера, ни земля не накапливают тепло, а это означает, что поглощенная теплота возвращается обратно. Длины волн этих излучаемых лучей длиннее (от 4 до 50 мкм) из-за более низкой преобладающей температуры в атмосфере и на Земле (см. рис. 2.5). [16]

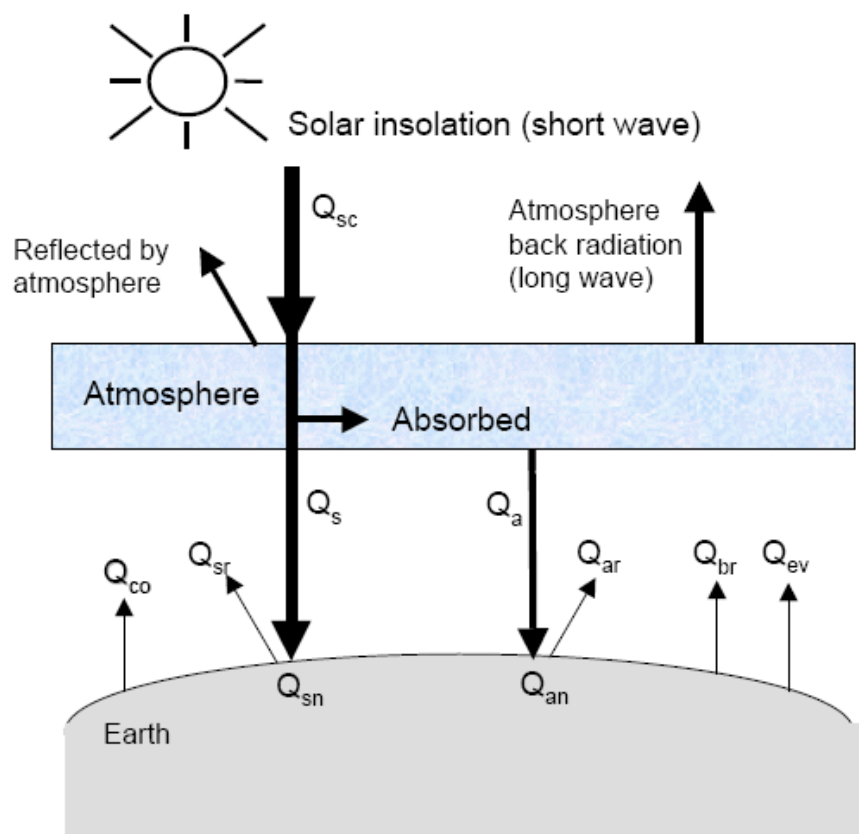


Рисунок 2.5 – Обзор механизмов теплообмена на поверхности

Q_{sc} – излучение (поток) солнечной радиации для ясного неба.

Q_{co} – потери тепла из-за конвекции.

Q_{sr} - отраженное солнечное излучение.

Q_s - солнечная радиация (коротковолновое излучение).

Q_{sn} - чистая падающая солнечная радиация (короткая волна), $= Q_s - Q_{sr}$.

Q_a - атмосферное излучение (длинноволновое излучение).

Q_{an} - чистое атмосферное излучение (длинная волна).

Q_{ar} - отраженное атмосферное излучение.

Q_{br} - обратное излучение (длинноволновое излучение).

Q_{ev} - потери тепла из-за испарения (скрытые).

В Delft3D-FLOW теплообмен на свободной поверхности моделируется с учетом отдельных эффектов солнечного (коротковолнового) и атмосферного (длинноволнового) излучения и потерь тепла из-за обратного излучения, испарения и конвекции.

В Delft3D-FLOW реализованы пять моделей теплового потока:

1. Тепловая модель 1. Предоставляется поступающая (коротковолновая) солнечная радиация для ясного неба. По модели рассчитываются чистое атмосферное (длинноволновое) излучение и тепловые потери, связанные с испарением, обратным излучением и конвекцией.
2. Тепловая модель 2. Предложено комбинированное солнечное (коротковолновое) и атмосферное (длинноволновое) излучение. Выражения, связанные с потерями тепла из-за испарения, обратного излучения и конвекции, вычисляются по модели.
3. Модель избыточной температуры. Вычисляется поток теплообмена на границе раздела воздух-вода. Требуется только фоновая температура.
4. Модель теплового потока Мураками. Предусмотрена коротковолновая солнечная радиация. Эффективная отраженная радиация и тепловые потери, связанные с испарением и конвекцией, вычисляются по модели. Входящее излучение поглощается как функция от глубины.
5. Модель теплового потока океана. Определяется доля неба, покрытого облаками (в%). Эффективная обратная радиация и тепловые потери, связанные с испарением и конвекцией, вычисляются по модели. Хорошо применима для крупных водных объектов и северных морей.

Полный тепловой поток через свободную поверхность рассчитывается следующим образом:

$$Q_{tot} = Q_{sn} + Q_{an} - Q_{br} - Q_{ev} - Q_{co}. \quad (2.32)$$

2.5 Приливные силы

Численные модели приливного движения в прибрежных морях обычно не учитывают прямое местное влияние сил, генерирующих приливы. Количество воды в этих моделях относительно невелико, и влиянием этих сил на поток можно пренебречь. Для прибрежных районов установка приливного воздействия вдоль открытых границ является достаточным для создания подходящего и точного приливного движения.

В числовых моделях прибрежных районов с глубокими участками вклад гравитационных сил в движение воды значительно возрастает и им больше нельзя пренебрегать. Силы, генерирующие приливы, происходят от Ньютоновских гравитационных сил земной системы (Солнца, Луны и Земли).

Предполагая, что Земля полностью покрыта водой и пренебрегая любыми вторичными эффектами, получаем статические приливы.

Статические приливы моделируются путем включения приливных генерируемых потенциальных выражений для статических приливов в уравнения импульса. Следующие два члена добавятся в правую часть уравнений 2.6 и 2.7:

$$\frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi}, \quad (2.33)$$

$$\frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \varphi}{\partial \eta}. \quad (2.34)$$

Приливной потенциал для статических приливов рассчитывается следующим образом:

$$\varphi = \sum_{v=0,1,2} \varphi_v(\lambda, \phi, t), \quad (2.35)$$

$$v = 0: \varphi_0 = K_i(1.5\cos^2\phi - 1) \cos(\omega_i t + 2\lambda + \chi_i), \quad (2.36)$$

$$v = 1: \varphi_1 = K_i \sin(2\phi) \cos(\omega_i t + \lambda + \chi_i), \quad (2.37)$$

$$v = 2: \varphi_2 = K_i \cos^2(\phi) \cos(\omega_i t + 2\lambda + \chi_i), \quad (2.38)$$

где $v = 0$ - для долгопериодных приливов;
 $v = 1$ - для суточных приливов;
 $v = 2$ - для полусуточных приливов;
 λ, ϕ - географические координаты;
 K_i - амплитуда;
 ω_i - частота;
 χ_i - астрономический аргумент относительно полночи (UTC);
 t - время.

2.6 Численная схема

В модели Delft3D уравнения мелкой воды дискретизированы в шахматном порядке на сетке «С» по классификации Аракавы. В данной сетке скаляры задаются в центрах ячейки, а компоненты скорости на соответствующих границах (см. рис. 2.6). [11]

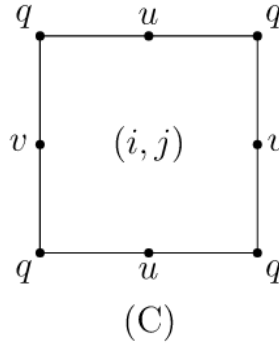


Рисунок 2.6 – Ячейка сетки «С» по классификации Аракавы

Обе горизонтальные составляющие вектора скорости u и v вычисляются один раз в течение полного времени Δt . Вертикальная адвекция и вязкость полностью интегрируются воедино, чтобы избежать чрезмерного малого шага времени, налагаемого относительно небольшими вертикальными сетчатыми пространствами вблизи дна и свободной поверхности. Выражения горизонтальной адвекции и вязкости интегрированы явно. Временной шаг ограничивается условием Куранта-Фридриха-Леви для горизонтальной адвекции. Уравнение мелкой воды решается разложением на множители по типу альтернативного неявного направления для баротропного давления.

В векторной форме (для двумерного случая), данный метод задается следующим образом:

Шаг первый:

$$\frac{\vec{U}^{l+1/2} - \vec{U}^l}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x \vec{U}^{l+1/2} + \frac{1}{2}A_x \vec{U}^l + B\vec{U}^{l+1/2} = \vec{d}, \quad (2.39)$$

Шаг второй:

$$\frac{\vec{U}^{l+1} - \vec{U}^{l+1/2}}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x \vec{U}^{l+1/2} + \frac{1}{2}A_x \vec{U}^{l+1} + B\vec{U}^{l+1} = \vec{d}, \quad (2.40)$$

$$A_x = \begin{pmatrix} 0 & -f & g \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & 0 \\ H \frac{\partial}{\partial x} & 0 & u \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix}, \quad (2.41)$$

$$A_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ f & 0 & g \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & H \frac{\partial}{\partial y} & v \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix}, \quad (2.41)$$

$$B = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.42)$$

где λ - линеаризованный коэффициент придонного трения;
 $\vec{d}$ - правая часть уравнения, содержащая члены горизонтальной адвекции, внешнее воздействие ветра и атмосферного давления.

Для улучшения стабильности нижнее трение интегрируется неявно для каждого этапа.

В случае трехмерных уравнений мелкой воды компоненты горизонтальной скорости соединяются в вертикальном направлении по вертикальной точке адвекции и вязкости. В вертикальном направлении применяется полностью неявный метод интегрирования по времени, который является точным во времени по порядку и приводит к трехдиагональным системам уравнений. Вертикальная связь уравнений дискретизированного импульса устраняется алгоритмом двойной развертки.

2.7 Расчетная сетка

Численный метод модуля Delft3d-FLOW основан на методе конечной разности. Для дискретизации трехмерного уравнения мелкой воды по

пространству, моделируемая зона покрывается либо криволинейной, либо равноудаленной сеткой (рисунок 2.7, 2.8). Координаты расчетной сетки могут быть в разных системах координат. Можно использовать как сферическую, так и метрическую систему координат.

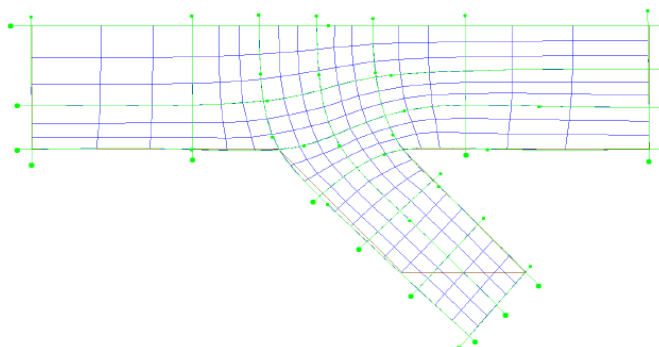


Рисунок 2.7 – Пример криволинейной расчетной сетки

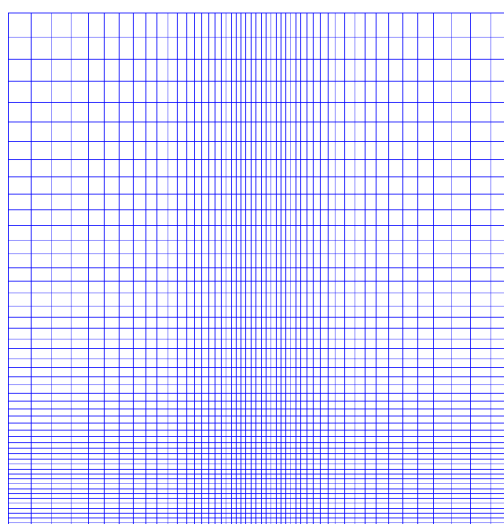


Рисунок 2.8 – Пример прямоугольной сетки

Для генерации сетки можно использовать любое программное обеспечение, которое способно выполнить поставленную задачу. Но в пакете с моделью идет генератор сеток RGRFGRID, который выводит уже готовые файлы в формате, который читается моделью. Если создавать сетку в другой программе, то файл должен иметь следующую структуру:

- Информация о файле, в начале каждой строчки ставится знак «*» (таким образом строка не воспринимается при чтении);

- Система координат (SPHERICAL или CARTESIAN);
- Значение отсутствия (при данном значении);
- количество точек по вертикали и горизонтали в одну строчку;

Далее идут отдельные блоки, со значениями координат в каждой линии сетки, причем отдельно для каждой из осей. Для наглядности, можно посмотреть на данный пример:

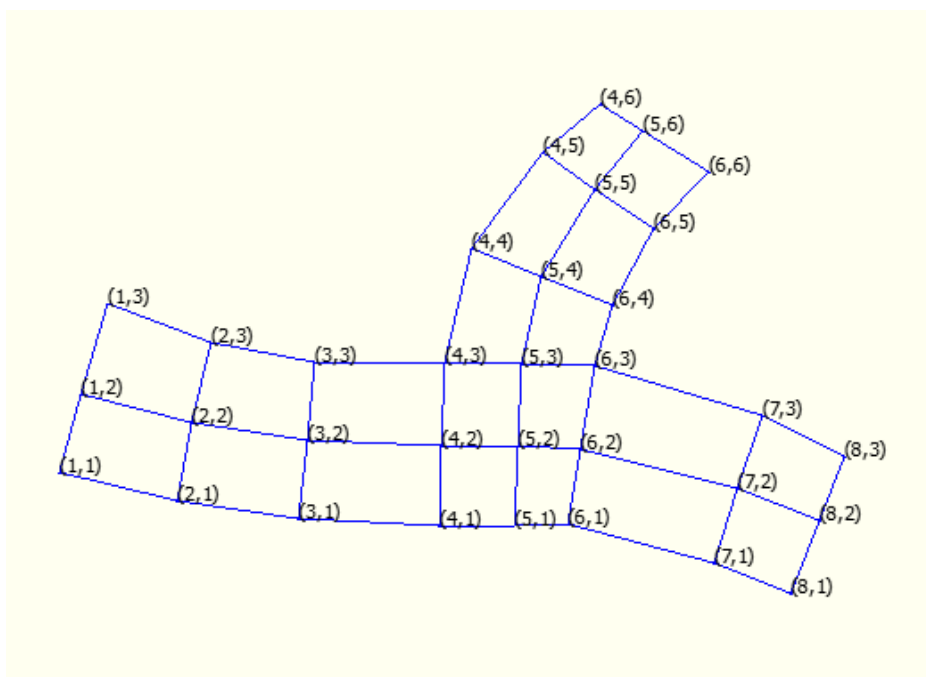


Рисунок 2.9 – Пример сетки

Пример файла формата «GRD» для модели:

```
*
*   Deltares,   RGFGRID Version   5.00.00.36850,   Nov  10
*   File creation   date: 2017-05-16,01:12:22
*
Coordinate System   =   Cartesian
Missing Value =   -1.00E+03
      8      6
      0      0      0
ETA=1   -469.155   41.294   568.118   1170.842   1498.044
        1729.811   2362.826   2690.213
```

ETA=2	-371.888	107.577	600.963	1184.376	1512.520
	1782.734	2460.310	2812.413		
ETA=3	-260.132	188.945	634.365	1198.667	1532.653
	1844.147	2565.936	2921.546		
ETA=4	-999.999	-999.999	-999.999	1311.197	1615.432
	1919.481	-999.999	-999.999		
ETA=5	-999.999	-999.999	-999.999	1621.249	1845.599
	2101.538	-999.999	-999.999		
ETA=6	-999.999	-999.999	-999.999	1869.612	2054.627
	2338.708	-999.999	-999.999		
ETA=1	906.411	785.429	704.413	673.458	677.776
	684.783	515.888	384.038		
ETA=2	1247.642	1118.746	1044.365	1024.396	1021.523
	1007.588	832.462	695.398		
ETA=3	1639.704	1469.966	1385.874	1381.275	1376.100
	1367.471	1153.746	973.463		
ETA=4	-999.999	-999.999	-999.999	1874.120	1748.703
	1631.442	-999.999	-999.999		
ETA=5	-999.999	-999.999	-999.999	2293.319	2128.278
	1961.619	-999.999	-999.999		
ETA=6	-999.999	-999.999	-999.999	2501.423	2384.872
	2205.892	-999.999	-999.999		

Переменные уровня воды и скорости (u , v , w) описывают течение. Для дискретизации трехмерного уравнения мелкой вод, переменные организованы особым образом на сетке. Структура при этом получается «шахматной». Эта конкретная компоновка переменных называется сетке «С» по классификации Аракавы (см. рис. 2.6). Точки уровня воды (точки давления) определяются в центре ячейки. Компоненты скорости находятся на границах ячеек. (см. рис. 2.6, 2.10, 2.11).

Пошаговые ступенчатые сетки имеют несколько преимуществ, таких как:

- Граничные условия могут быть реализованы довольно простым способом;
- Для получения такой же точности можно использовать меньшее количество дискретных переменных состояния по сравнению с дискретизациями на нешаблонных сетках;
- Шахматные сетки для мелководных решеток предотвращают пространственные колебания уровня воды.

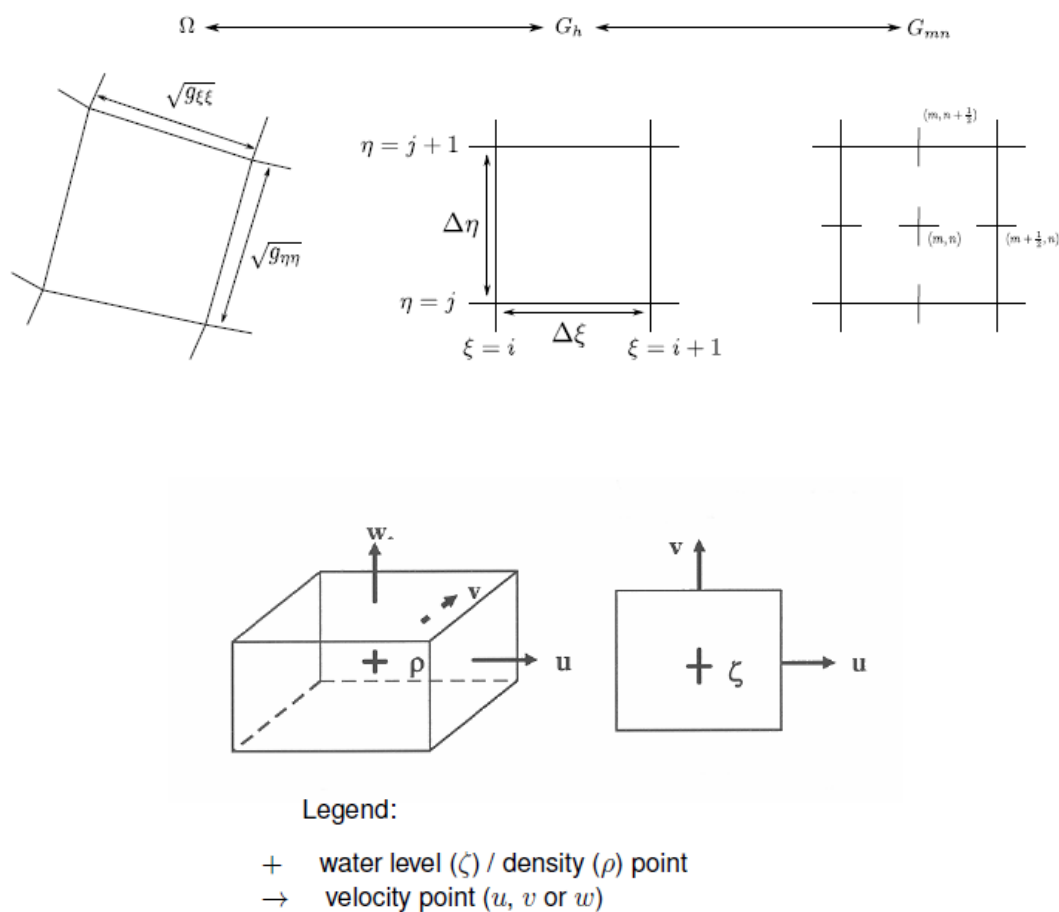
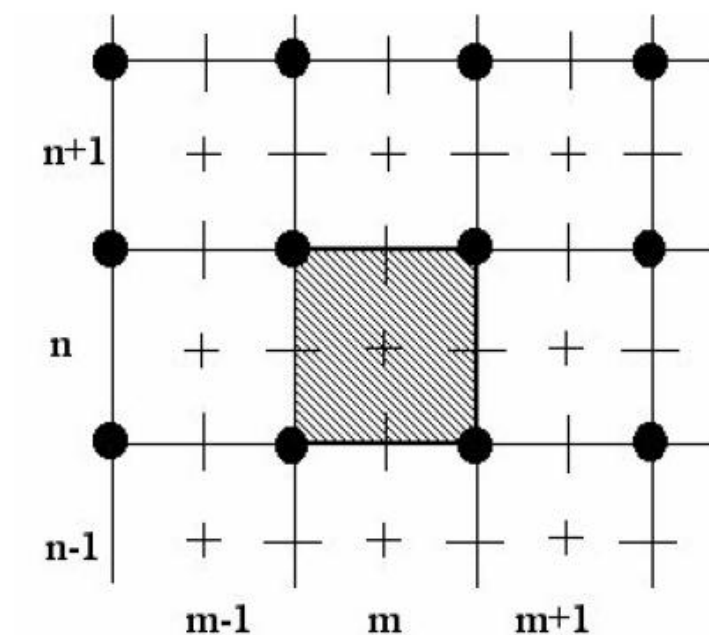


Рисунок 2.10 - Отображение ячеек и узлов сетки в вычислительном пространстве, а также расположение компонентов



- Сплошные линии – расчетная сетка
 + - уровень воды, температура, соленость
 — - горизонтальный компонент скорости u
 | - горизонтальный компонент скорости v
 • - глубина

Рисунок 2.11 – Расположение компонент на расчетной сетке

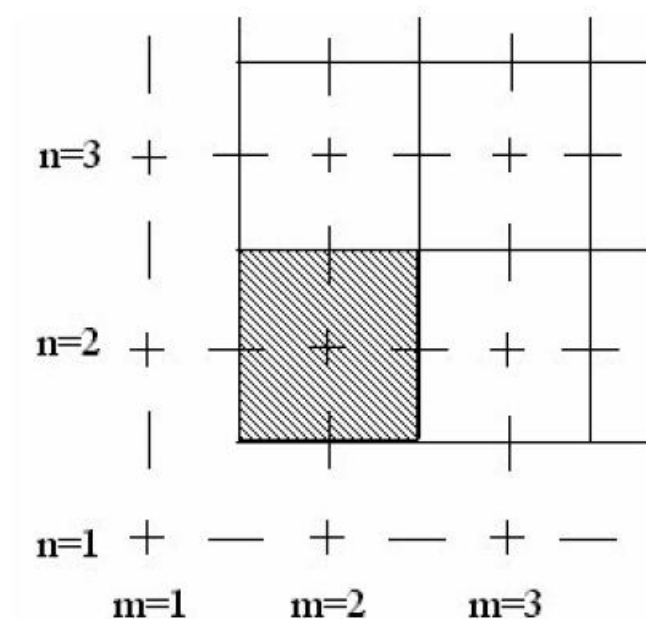


Рисунок 2.12 Расположение компонент в углу расчетной сетки

2.8 Графический интерфейс модели и входные файлы

Для удобства в модели Delft3D предусмотрен пользовательский графический, в котором можно задать все необходимые параметры, а также указать пути к входящим файлам. В данной работе использовалась версия Delft3D 4.01.01.rc.03.

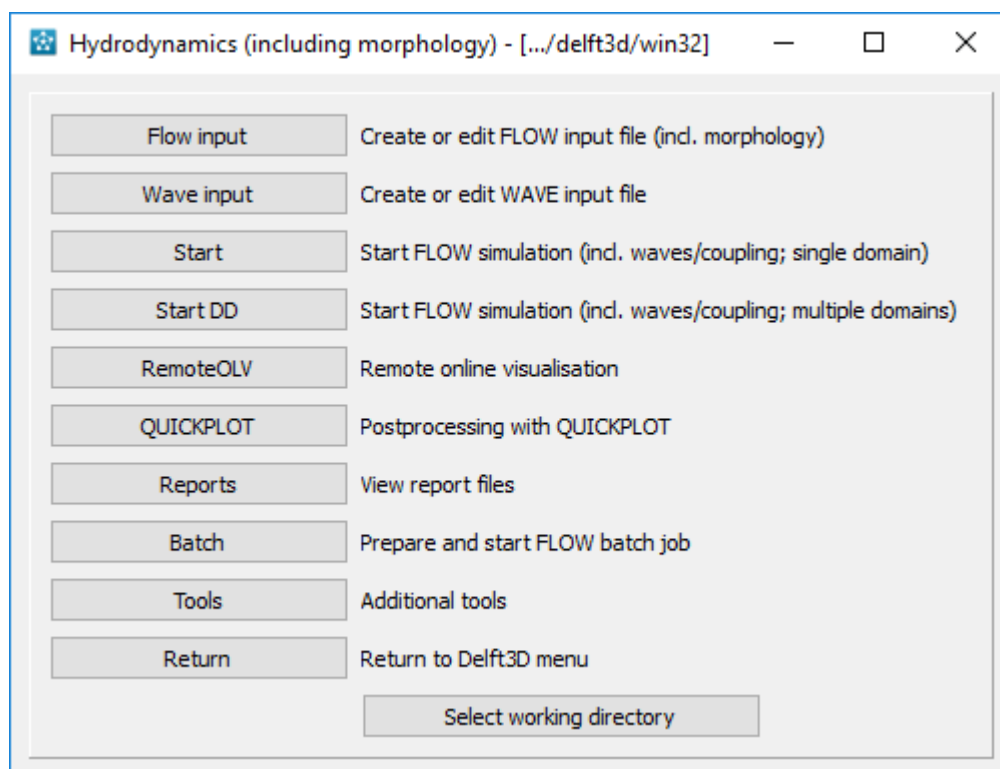


Рисунок 2.14 – Главное окно модуля Delft3D-FLOW

Выбрав в главном меню модуля Delft3D-FLOW пункт «Flowinput» (см. рис. 2.14), откроется окно редактирования файла «MDF», в котором содержатся все входные параметры для самой модели. Окно разделено на вкладки, каждая из которых отвечает за определенные параметры (см. рис. 2.15).

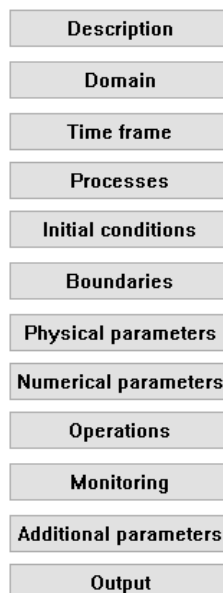


Рисунок 2.15 – Вкладки окна редактирования модуля Flow

Во вкладке «Domain» можно указать путь к файлу сетки, корпусу сетки (см. рис. 2.16) и файлу с батиметрией (см. рис. 2.17).

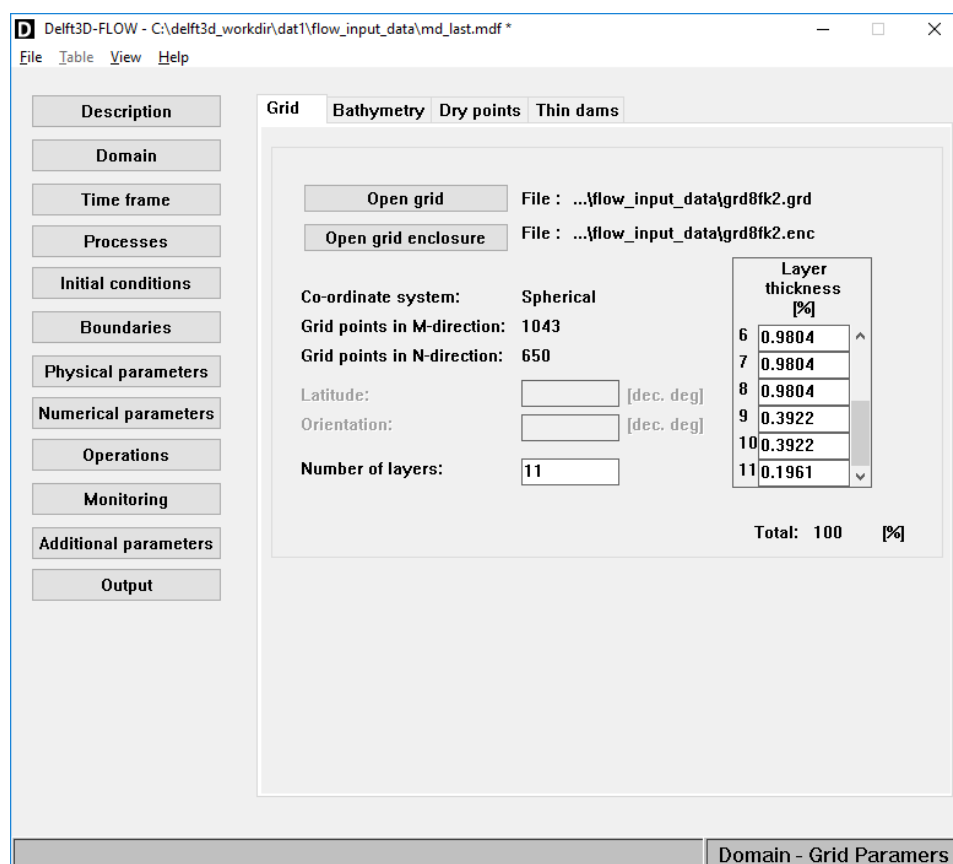


Рисунок 2.16 – Указание файла сетки, ее корпуса, толщины и количества слоев по глубине

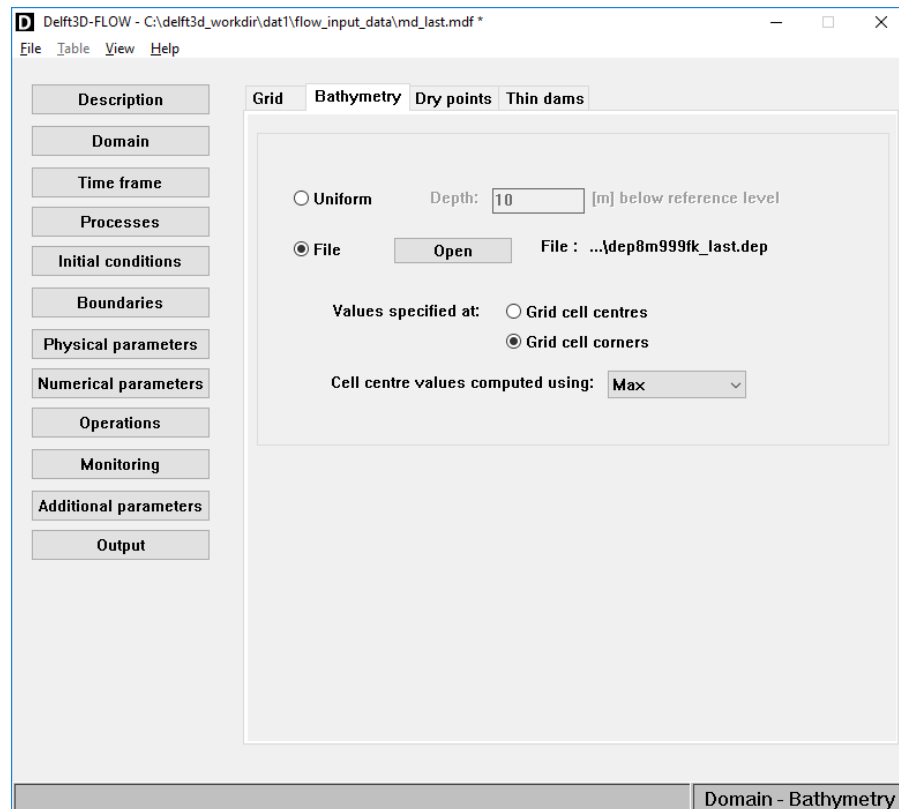


Рисунок 2.17 – Указание файла батиметрии

Так же здесь можно указать толщину и количество слоев по глубине. Самый верхний слой будет иметь самый последний номер в таблице толщин. Толщина слоя задается в процентах от общей глубины (от поверхности до самой глубокой точки) (см. рис. 2.18).

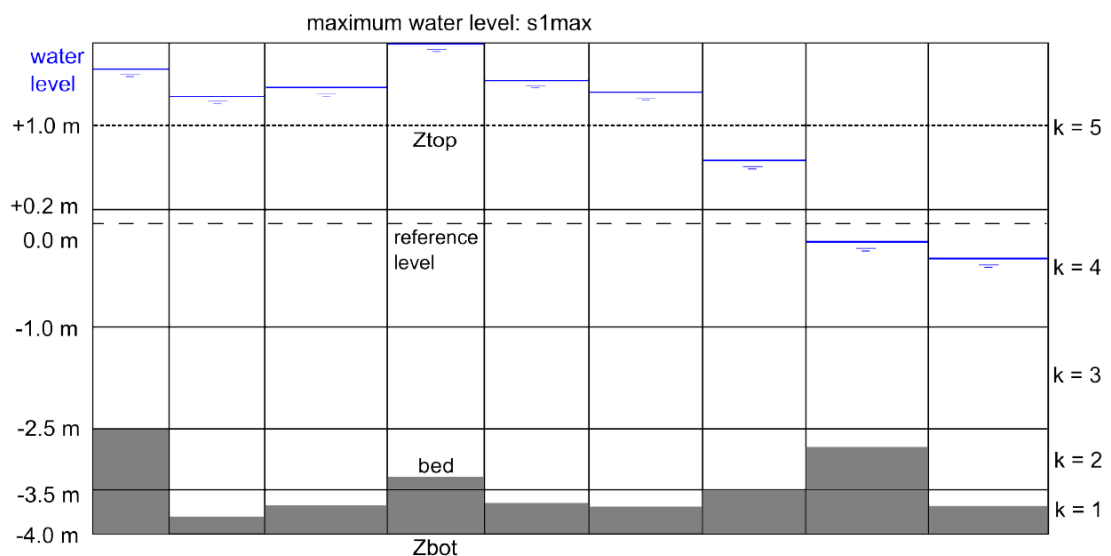


Рисунок 2.18 – Вертикальная конструкция сетки (Z-координаты)

Здесь же можно указать сухие точки и плотины.

Во вкладке «Timeframe» задается время начала расчета, его конца, а также шаг по времени (см. рис. 2.19).

Delft3D-FLOW - C:\delft3d_workdir\dat1\flow_input_data\md_last.mdf *

File Table View Help

Description

Domain

Time frame

Processes

Initial conditions

Boundaries

Physical parameters

Numerical parameters

Operations

Monitoring

Additional parameters

Output

Time frame

Reference date 26 05 2017 [dd mm yyyy]

Simulation start time 26 05 2017 00 00 00 [dd mm yyyy hh mm ss]

Simulation stop time 28 05 2017 00 00 00 [dd mm yyyy hh mm ss]

Time step 1 [min]

Local time zone (LTZ) 0 +GMT

GMT = Local time - LTZ

Time frame

Рисунок 2.19 – Задание временных параметров

Во вкладке «Processes» указываются те процессы, которые будут учитываться при расчете, а именно расчет солёности, температуры, примесей и донных отложений, будет ли учитываться ветер и генерация приливных сил (см. рис. 2.20). Последнее доступно только для сферических координат. Так же именно здесь можно подключить модуль Delft3D-WAVE для параллельного расчета. Благодаря этому, на каждом шагу по времени модули могут работать сообща, передавая друг-другу данные. Это более эффективно, чем расчет каждого модуля по-отдельности.

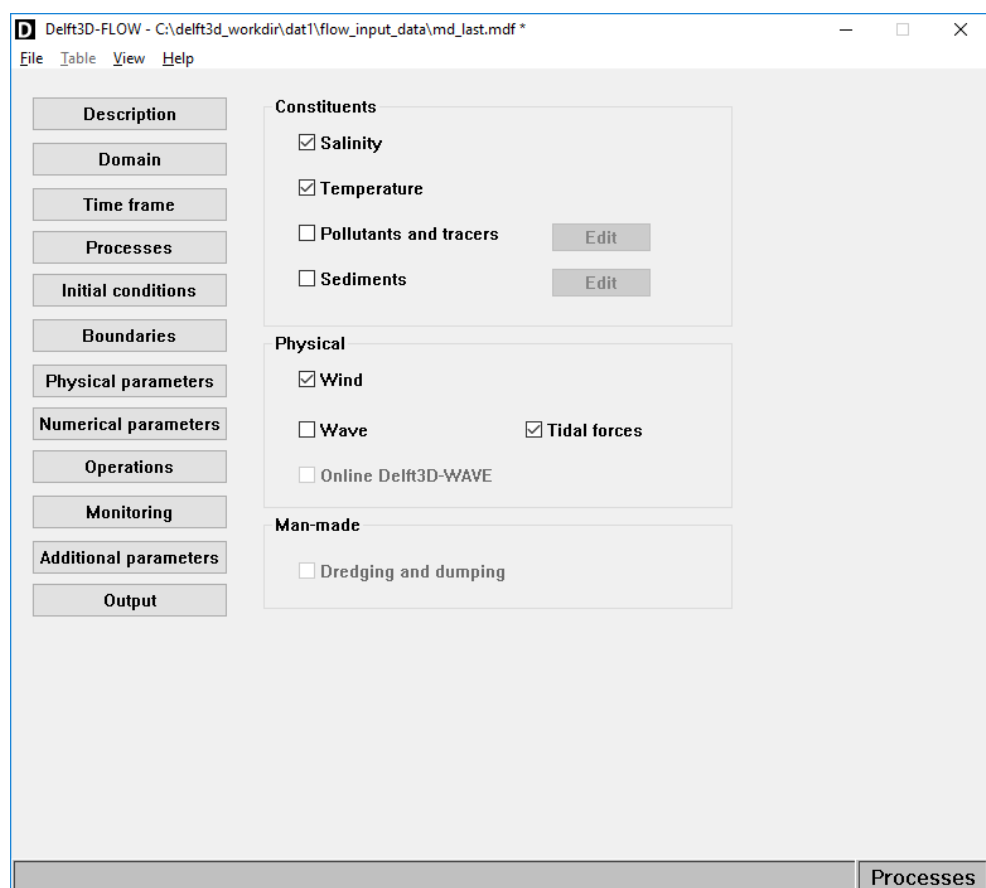


Рисунок 2.20 – Выбор процессов при расчете

Во вкладке «Initialconditions» указываются начальные условия уровня воды и выбранных процессов (например, температуры и солености) разными способами (см. рис. 2.21). Можно указать одно и тоже значение по всей акватории, либо отдельно для каждой расчетной точки. Для этого понадобится файл со значениями для всех нужных параметров на каждом горизонте по глубине и в каждой точке по горизонтали. Так же начальными условиями может послужить последний шаг в предыдущем расчете модели, что позволяет продолжить вычисления, если расчет был прерван.

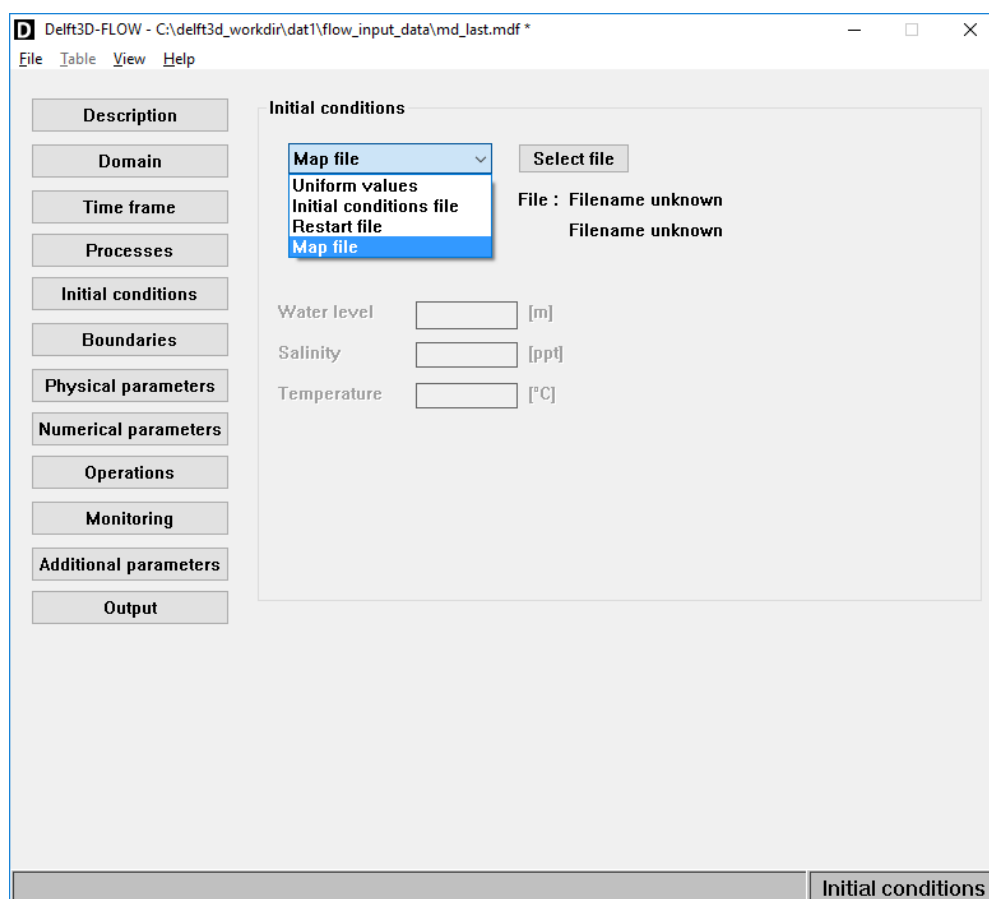


Рисунок 2.21 – Начальные условия

Во вкладке «Boundaries» задаются и редактируются граничные условия (см. рис. 2.22). Наглядно создать их можно в окне «View-Visualisationarea» (см. рис. 2.25). Именно здесь можно выбрать тип открытой границы (уровень воды, течение, Неймана, полного расхода, Реймана), в каком виде она будет задана (гармоники или изменении по времени), а также необходимые значения соответствующих переменных (см. рис. 2.23, 2.24).

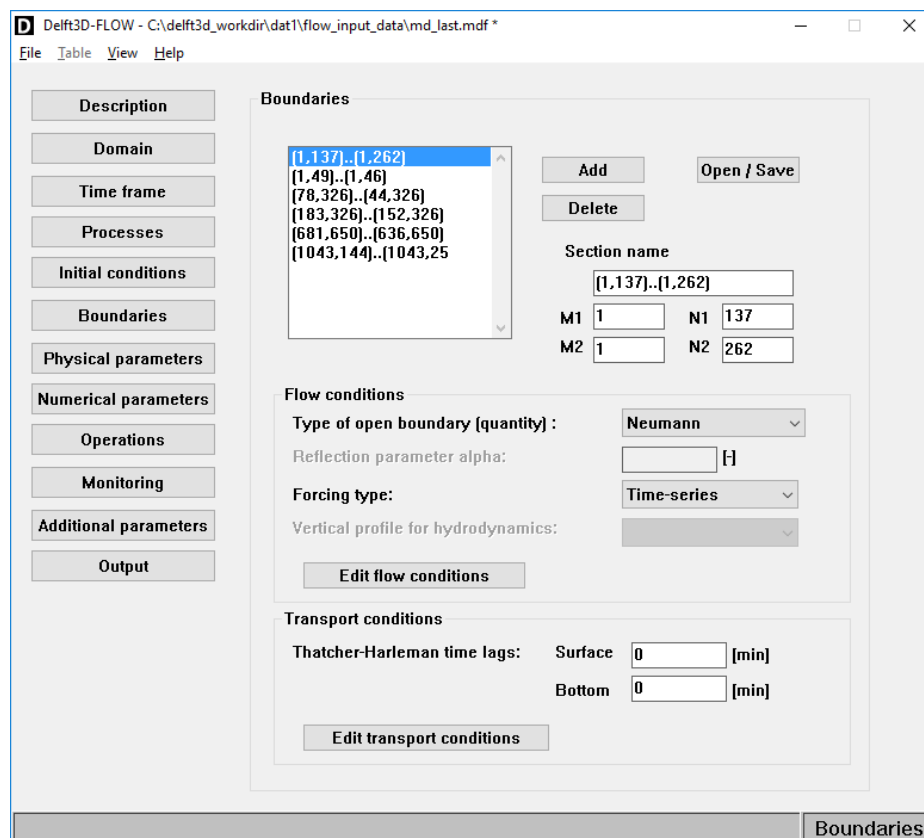


Рисунок 2.22 – Окно редактирования граничных условий

D Boundaries : Flow Conditions

Table

Boundary: 1
Quantity: Water level
Forcing type: Time-series
Vertical profile: n.a.

Time dd mm yyyy hh mm ss	Begin [m]	End [m]
15 05 2016 00 00 00	0.55	0.13
15 05 2016 06 00 00	0.65	0.17
15 05 2016 12 00 00	0.71	0.22
15 05 2016 18 00 00	0.74	0.26
16 05 2016 00 00 00	0.74	0.29
16 05 2016 06 00 00	0.70	0.3
16 05 2016 12 00 00	0.64	0.28
16 05 2016 18 00 00	0.56	0.26

Close

Рисунок 2.23 – Значения уровня воды на одной из открытых границ

коэффициента ветрового сопротивления, шероховатости на дне и стенках, вертикальной и горизонтальной турбулентной вязкости, и диффузии, а также есть возможность выбрать модель трехмерной турбулентности.

Hydrodynamic constants

Gravity

9.81

[m/s²]

Water density

1024

[kg/m³]

Air density

1

[kg/m³]

Wind drag coefficients

Breakpoints	Coefficient		Wind speed	
A	0.00063	[1]	0	[m/s]
B	0.0013	[1]	15	[m/s]
C	0.00723	[1]	100	[m/s]

Bottom roughness

Roughness formula:

Chezy

▼

☒ Uniform

U:

65

V:

65

☐ File

Select file

File: Filename unknown

Wall roughness

Slip condition:

Free

▼

Roughness length:

0

[m]

Background horizontal viscosity/diffusivity

☒ Uniform

Horizontal eddy viscosity

1

[m²/s]

Horizontal eddy diffusivity

10

[m²/s]

☐ File

Select file

File : Filename unknown

Model for 2D turbulence

☐ Subgrid scale HLES

Edit

Background vertical viscosity/diffusivity

Vertical eddy viscosity

0

[m²/s]

Vertical eddy diffusivity

0

[m²/s]

Ozmidov length scale

0

[m]

Model for 3D turbulence

☐ Constant

☐ k-L

☐ Algebraic

☒ k-Epsilon

Рисунок 2.26 – Физические параметры

В этой же вкладке задается ветер, приливные силы и тип модели переноса тепла.

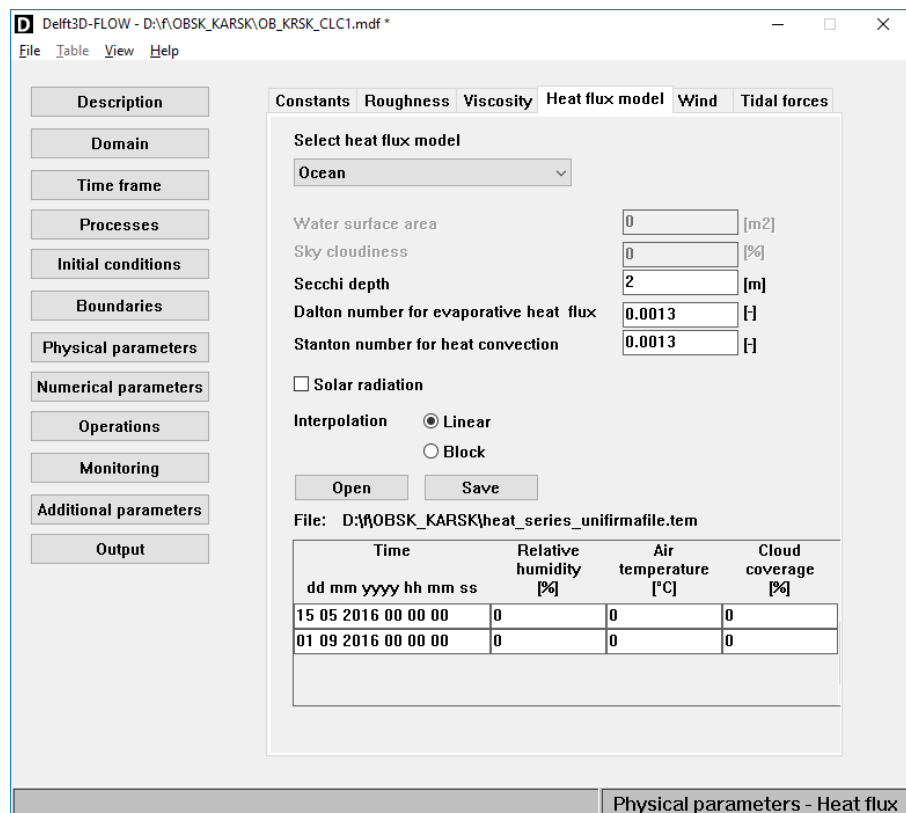


Рисунок 2.27 – Выбор типа модели переноса тепла

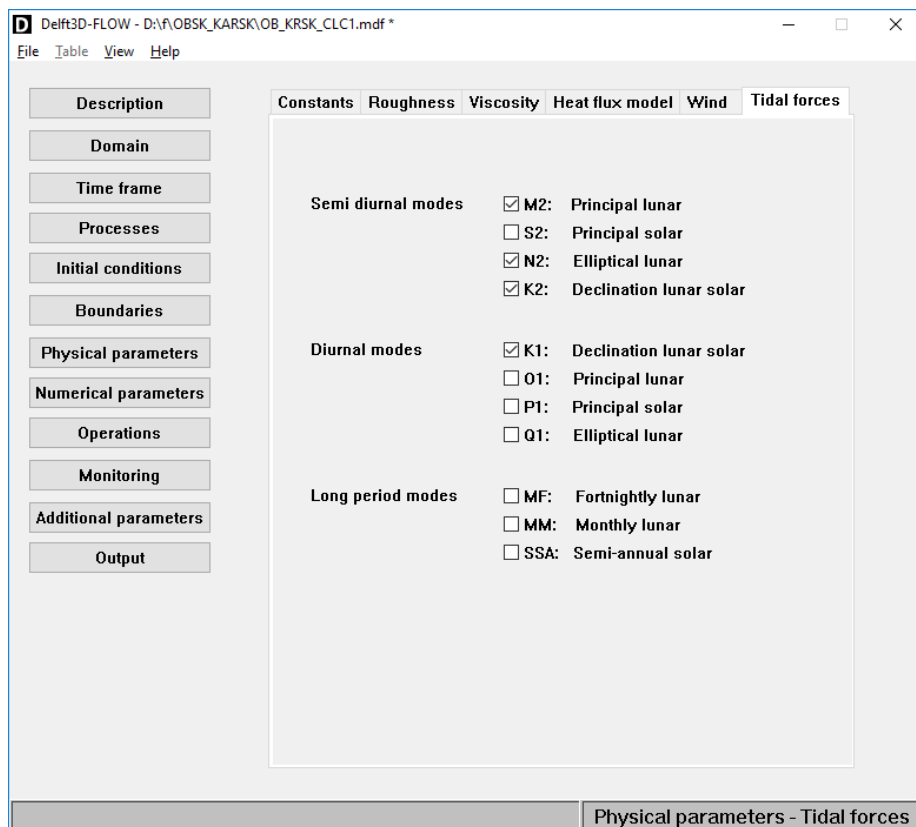


Рисунок 2.28 – Выбор приливных сил

Во вкладке «Numericalparameters» задаются численные параметры модели (см. рис. 2.28). Именно здесь можно указать предельное значение глубины, время сглаживания и так далее.

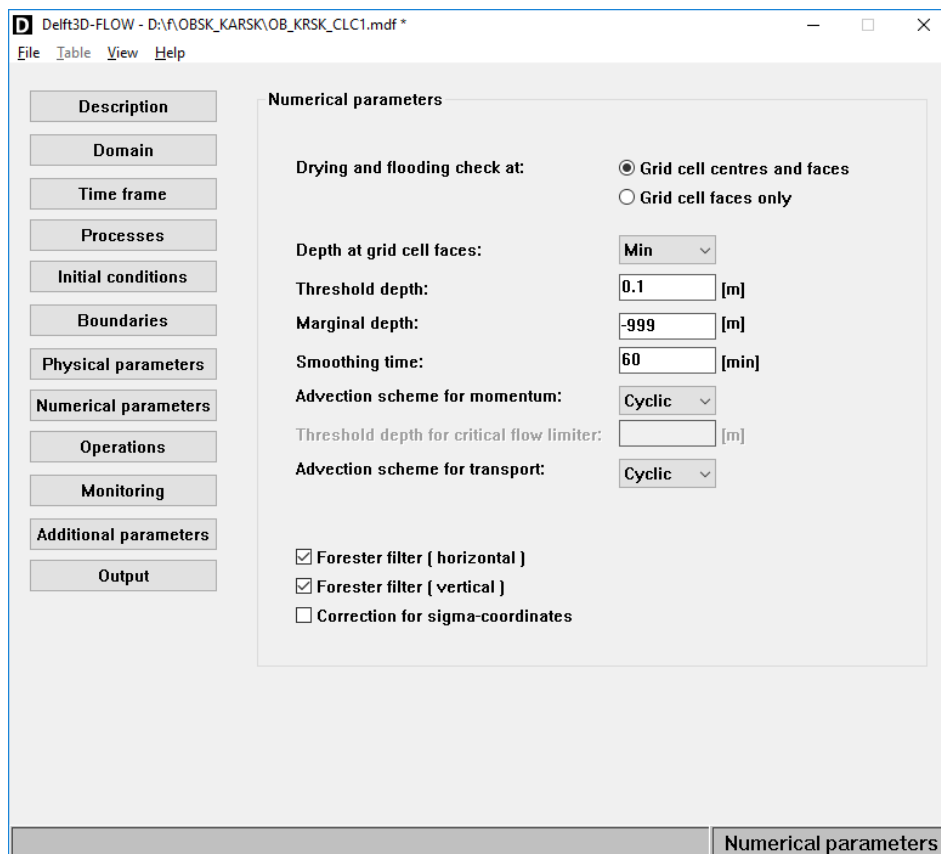


Рисунок 2.29 – Численные параметры модели

Не менее важной является вкладка «Additionalparameters». Здесь задаются те параметры, которые еще нельзя изменять в графическом интерфейсе, но присутствуют в самой модели. Такими параметрами являются изменение ветра по времени и пространству, метеорологических характеристик (температуры воздуха, влажности, облачности), которые используются в модели переноса тепла. Для того, чтобы модель учитывала какой-либо параметр, нужно добавить в список ключ и его значение, которые указываются между знаками «#». В таблице 2.1 приведены некоторые параметры, которые были использованы в данной работе:

Таблица 2.1 Ключи и их значения для дополнительных параметров

Ключ	Значение
Filwpr	Имя файла со значениями давления
Filwu	Имя файла со значениями компоненты ветра U
Filwv	Имя файла со значениями компоненты ветра V
Filwt	Имя файла со значениями температуры воздуха
Filwc	Имя файла со значениями облачности
Filwr	Имя файла со значениями относительной влажности
Zmodel	Использовать Z-модель
Zbot	Максимальное значение глубины
Ztop	Верхнее значение (см. рис. 2.18)

Файлы метеорологических значений для тепловых моделей и расчета течений могут быть предоставлены на отдельной прямоугольной сетке. Для удобства, шапка файла приведена в виде таблицы 2.2:

Таблица 2.2 Описание параметров шапки

Параметр	Значение
FileVersion	1.03
filetype	meteo_on_equidistant_grid
NODATA_value	-999.000
n_cols	Количество столбцов, используемых для данных поля ветра
n_rows	Количество строк, используемых для данных поля ветра
grid_unit	m или degree
x_corner	X-координата нижней левой точки сетки
y_corner	Y-координата нижней левой точки сетки
dx	шаг сетки по долготе
dy	шаг сетки по широте
n_quantity	1 (количество переменных в файле)

quantity1	x_wind для компоненты ветра U, y_wind для компоненты ветра V, air_pressure для давления воздуха, air_temperature для температуры воздуха, relative_humidity для относительной влажности, cloudiness для облачности
unit1	ms-1 для скоростей ветра, Pa для давления, Celsius для температуры воздуха, % для относительной влажности и облачности

После шапки идет строка определения времени, которая имеет фиксированный формат, используемый для полного определения времени, в которое действительный набор данных. Строка определения времени имеет следующий формат:

`TIMEminutes/hourssinceYYYY-MM-DDHH:MM:SSTIMEZONE`

За определением времени следует блок данных входных значений, соответствующих указанному времени. Блок данных содержит значения определенного параметра в x и y-направлении для массива «n_cols» на «n_rows», начиная с верхней левой точки. Определение времени и блок данных повторяются для каждого временного экземпляра временного ряда.

3.1 Расчетная сетка

Для расчетов гидродинамики в данной работе в Обской губе была построена криволинейная ортогональная сетка на всю ее акваторию, включая Тазовскую губу. Для более подробной картины в расчетную область было включено Карское море (см. рис. 3.1). Сетка сгенерирована в программе RGFGRID.

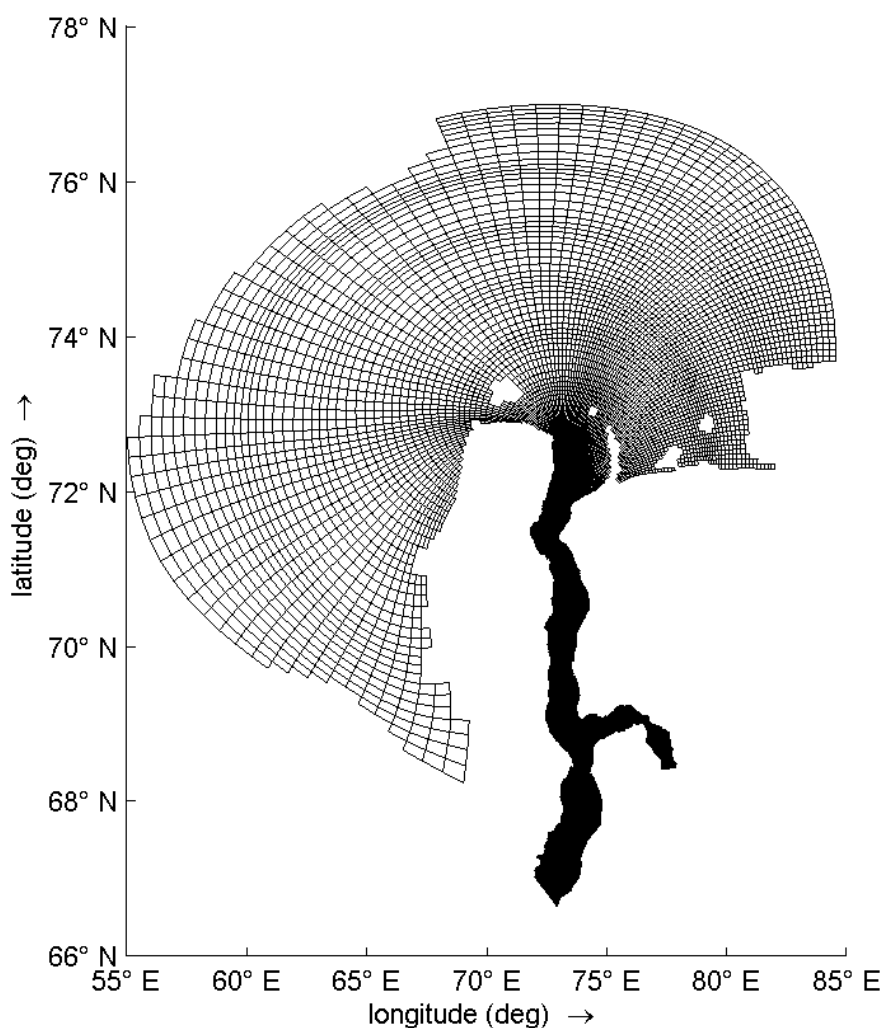


Рисунок 3.1 – Расчетная сетка

Она имеет размер 459 на 420 точек. В самом узком месте сетки пространственный шаг составляет 150 метров.

Само по себе явление стратификации (разбиение толщи воды на слои) вынуждает использовать трехмерную вычислительную сетку. Было задано 11 слоев, последовательно расположенных в вертикальном направлении. Деление на уровни подбирается с таким условием, чтобы сформировать массив маленьких ячеек в приповерхностном слое и обеспечить нормальное распределение в нижележащих слоях. Толщину всех слоев можно увидеть в таблице 3.1. Первый слой является подповерхностным, и далее по убыванию в сторону дна.

Таблица 3.1 Толщина слоев вертикальной сетки

Номер слоя	Толщина слоя(%)	Толщина слоя (м)	Глубина нижней границы слоя (м)
1	0.20619	1	1
2	0.41237	2	3
3	0.41237	2	5
4	1.0309	5	10
5	1.0309	5	15
6	1.0309	5	20
7	6.1856	30	50
8	10.3093	50	100
9	20.6186	100	200
10	41.2371	200	400
11	17.5258	85	485

3.2 Батиметрия и входные метеофайлы

Данные по глубине были взяты из общей батиметрической карты океанов (GEBCO) [14]. После чего с помощью программы QUICKINони были

интерполированы в узлы расчетной сетки методом триангуляционной интерполяции (см. рис. 3.2).

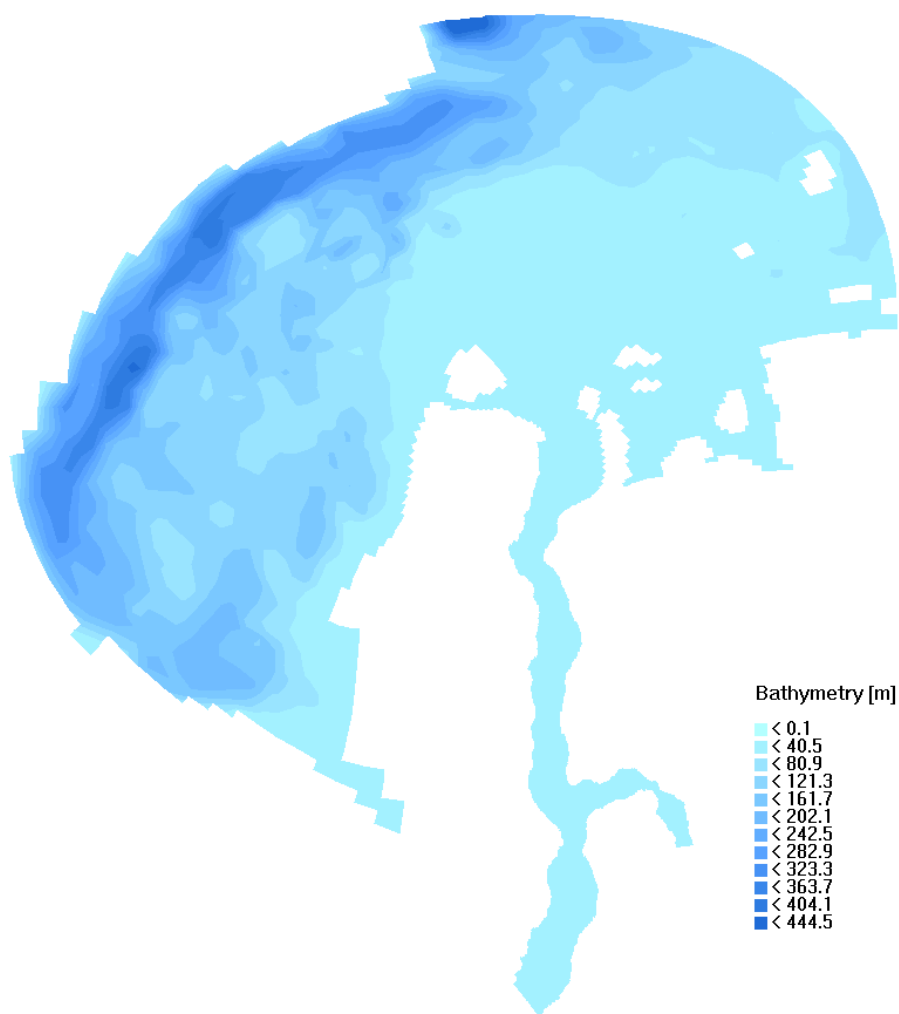


Рисунок 3.2 – Глубины в выбранной акватории

Данные по ветру, атмосферному давлению, температуре воздуха, облачности и относительной влажности были взяты из реанализа ERA-Interim [13]. Система ассимиляции данных, используемая для создания ERA-Interim, основана на выпуске IFS (Cy31r2) 2006 года. Система включает 4-мерный вариационный анализ (4D-Var) с 12-часовым аналитическим окном. Пространственное разрешение набора данных составляет приблизительно 80 км на 60 вертикальных уровнях от поверхности до 0,1 гПа.

Период расчета модели был выбран с 15 мая по 31 августа 2016 года. Соответственно, метеорологические данные были получены именно на этот период с шагом по времени 6 часов.

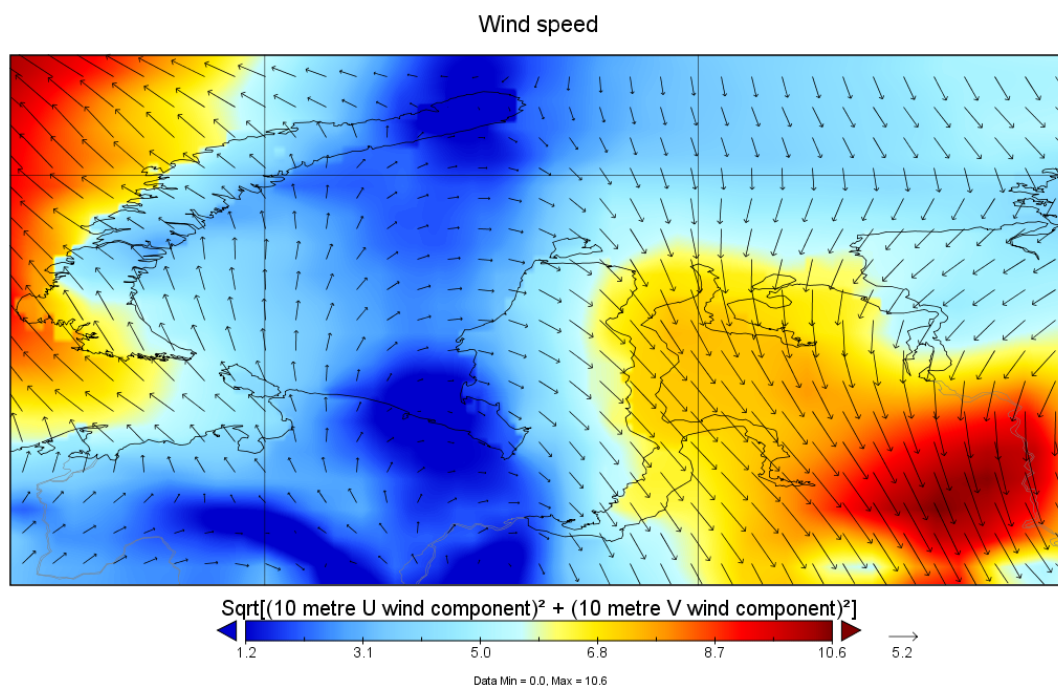


Рисунок 3.3 – Пример данных по ветру на время начала расчета

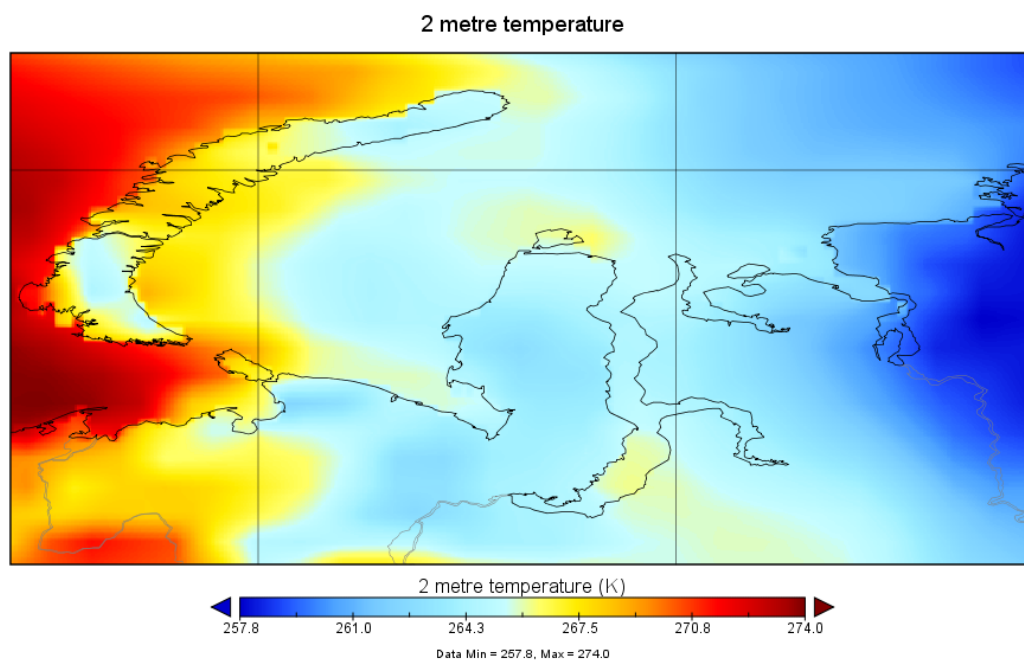


Рисунок 3.4 – Пример данных по температуре воздуха на время начала расчета

3.3 Начальные условия

Начальные условия были взяты из атласа NOAA (WorldOceanAtlas)[15] на основе базы данных «World Ocean Database». Для этого были скачаны данные по солености и температуре на всех необходимых горизонтах, после чего они были интерполированы в узлы сетки методом триангуляционной интерполяции на соответствующие горизонты.

Уровень воды в начальный момент времени равен 0 м.

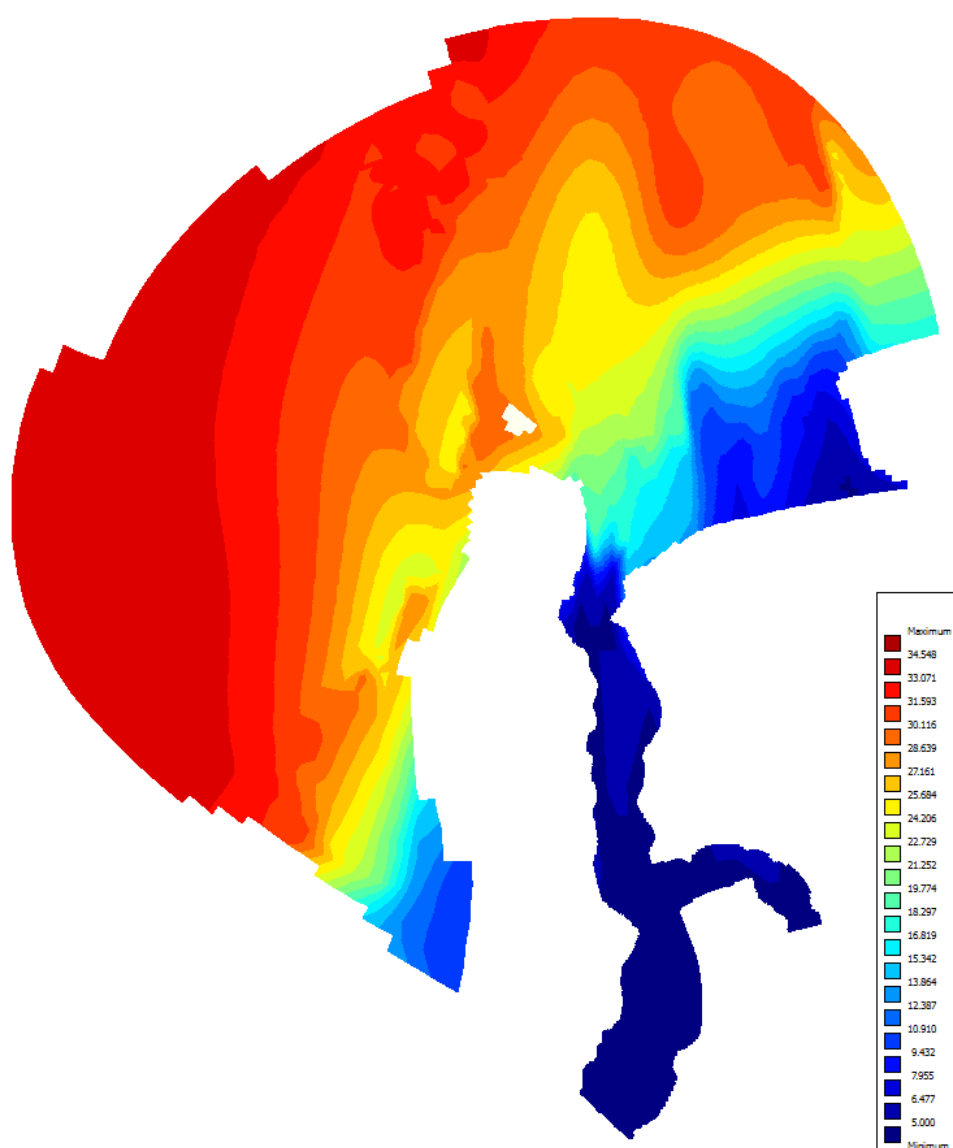


Рисунок 3.5 – Начальные условия по солености в поверхностном слое

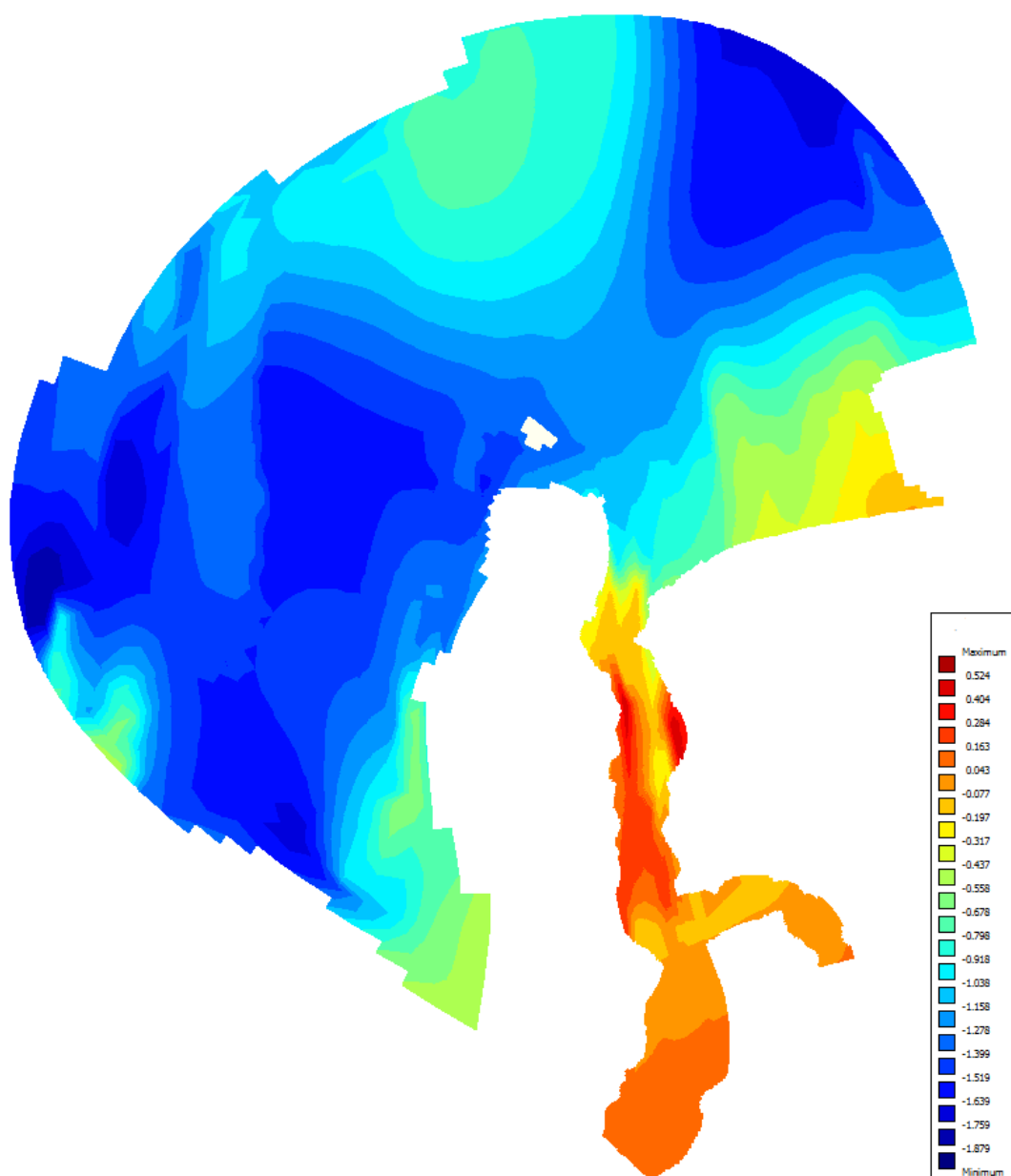


Рисунок 3.6 – Начальные условия по температуре в поверхностном слое

3.4 Граничные условия

Всего было задано 6 открытых границ. Первая находится на севере расчетной сетки в Карском море и протягивается от Новой Земли до Пясинского залива. Вторая граница отвечает за пролив Карские ворота. Третья и четвертая открытая граница находятся в Гыданской губе и Енисейском заливе. Пятая располагается в Тазовской губе, а последняя на юге Обской губы. Наглядно их расположение можно увидеть на рисунке 3.7.

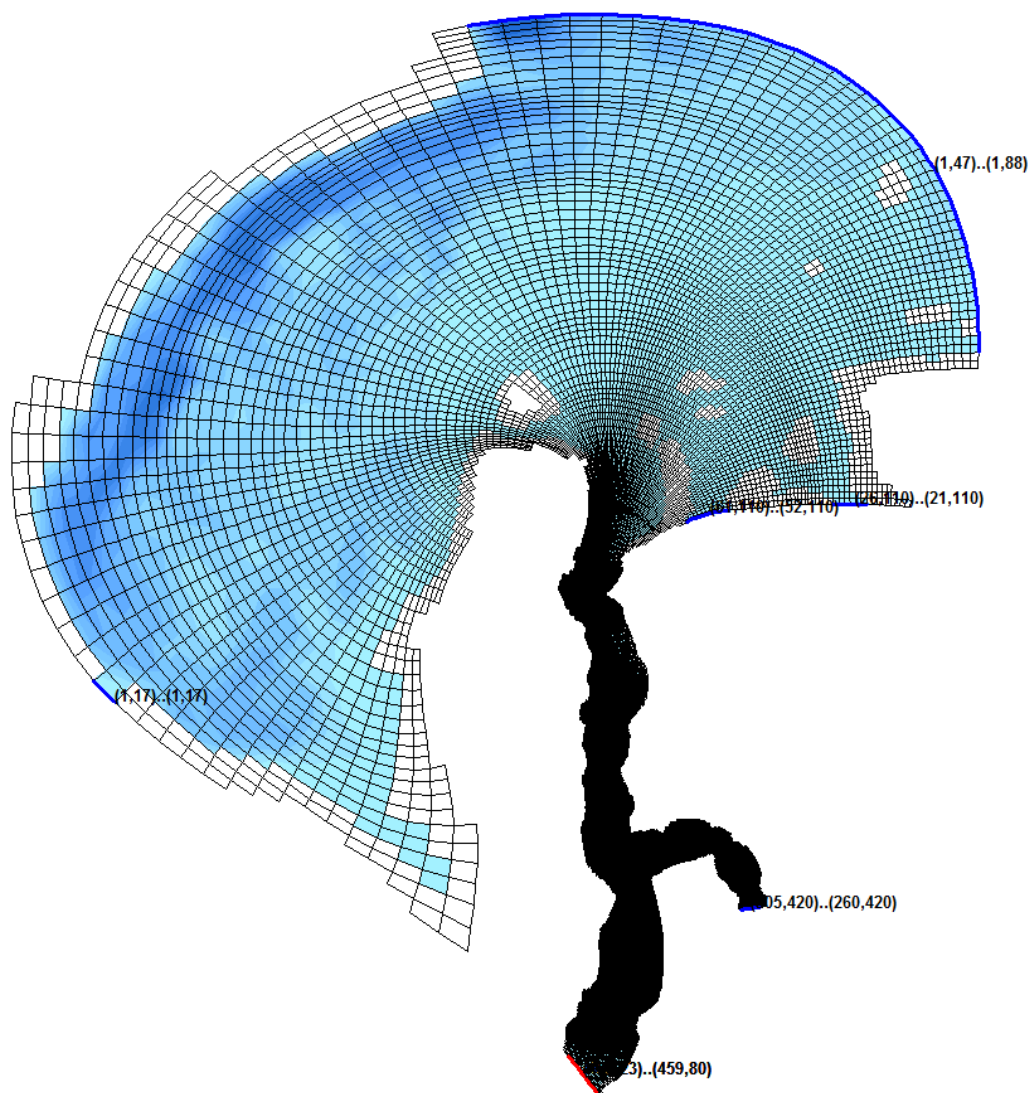


Рисунок 3.7 – Расположение открытых границ

Для первой и второй границы были взяты данные по изменению уровня во времени под влиянием приливообразующих сил в программе WXTide32 [18]. На рисунке 3.8 можно увидеть уровень воды за период с 15 мая по 15 июня. На графике видно влияние приливообразующих сил.

На остальных открытых границах был задан расход равный 0 м³/с, а колебания уровня не учитывалось.

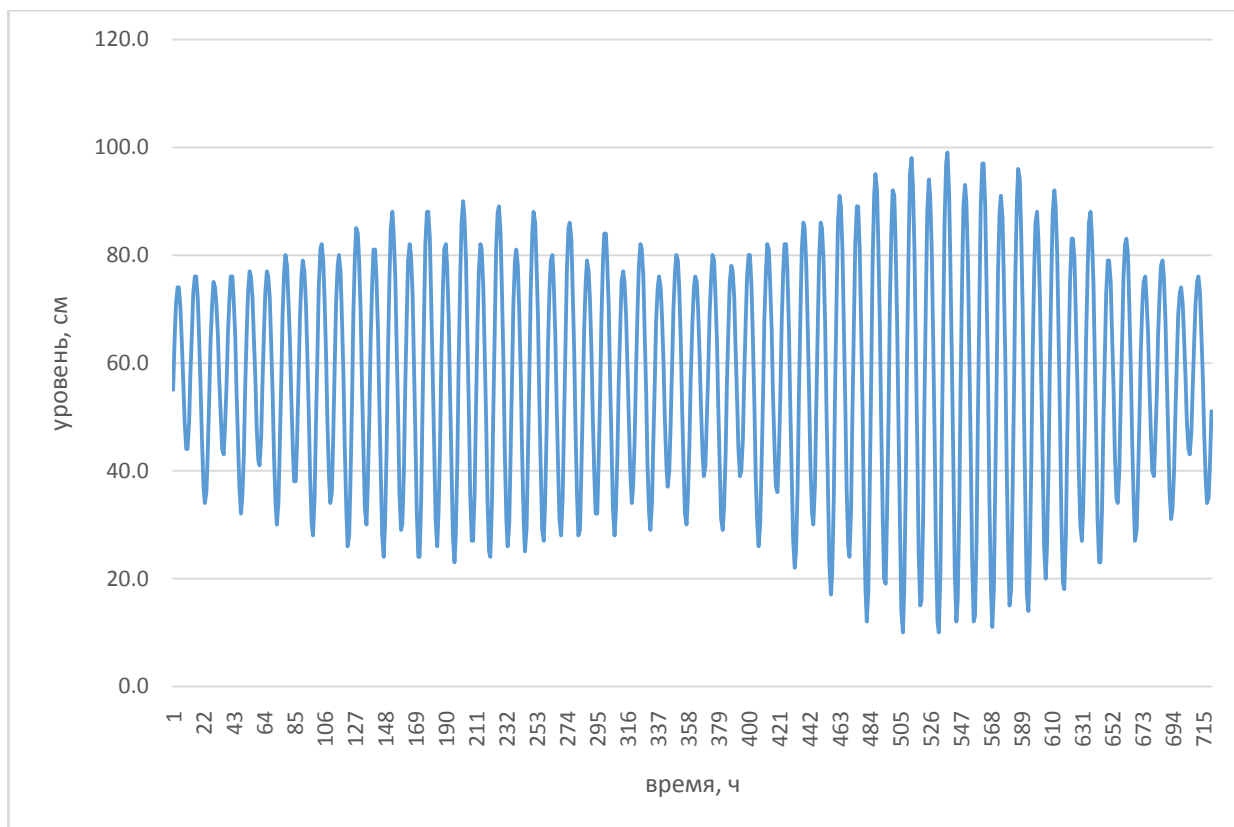


Рисунок 3.8 – Уровень воды на первой открытой границе в первый месяц расчета

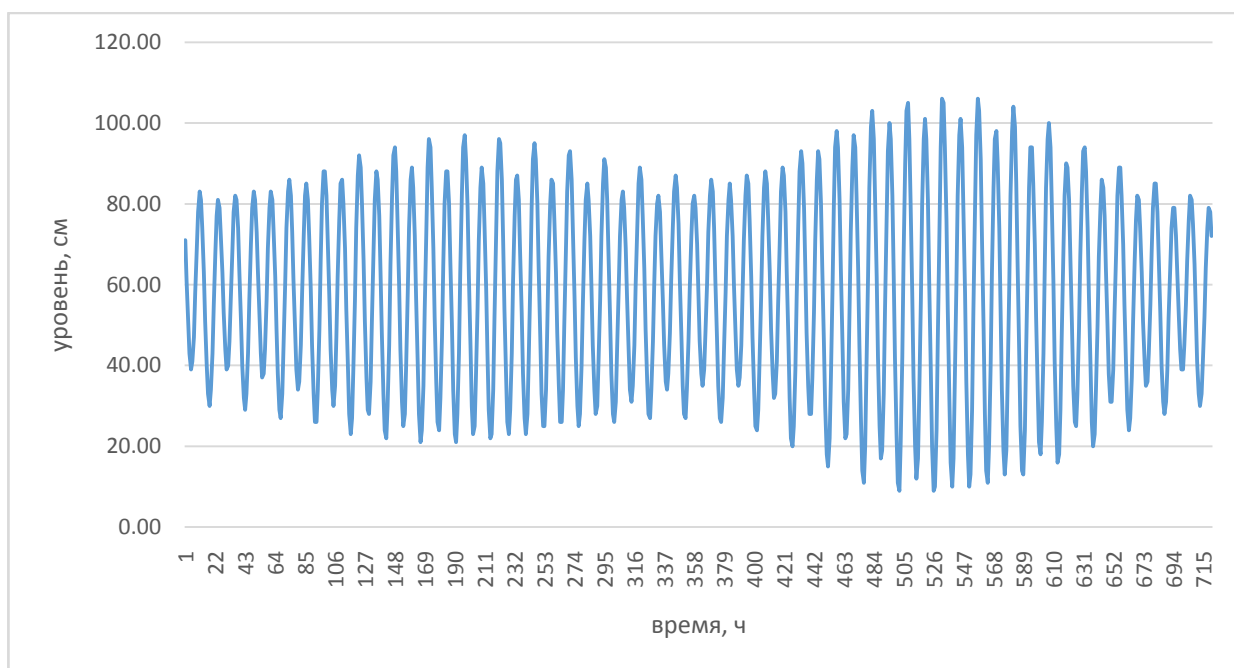


Рисунок 3.9 – Уровень воды на второй открытой границе в первый месяц расчета

4 Результаты моделирования

Моделирование гидродинамических характеристик в Карском море, Обской и Тазовской губе было выполнено за летний период с 15 мая по 31 августа. В результате были полученные данные по уровню воды, а также скоростям течений и солености во всех заданных толщах воды (см. табл. 3.1).

Для наблюдения за скоростями и направлениями течений, волновым режимом и колебаниями уровня моря в сентябре 2015 г. на акватории Обской губы в районе Салмановского месторождения было установлено 2 автономных донных станций (АДС) в составе доплеровского акустического профилографа AWAC AST 600 kHz. Сведения об установленных АДС приведены в таблице 3.1. Схема постановки станций представлена на рисунке 3.1.

Таблица 3.1 – Сведения об АДС, установленных в районе Салмановского месторождения

Номер станции	Глубина (м)	Постановка		Подъем	
		дата	время (UTC)	дата	время (UTC)
1	24	16.09.15	15:05	25.08.16-	04:00-
2	24	16.09.15	16:05	25.08.16-	07:45-

Данные измерений приборов были извлечены в полном объеме, что позволяет провести статистический анализ рядов наблюдений характеристик течения, волнения и уровня моря.

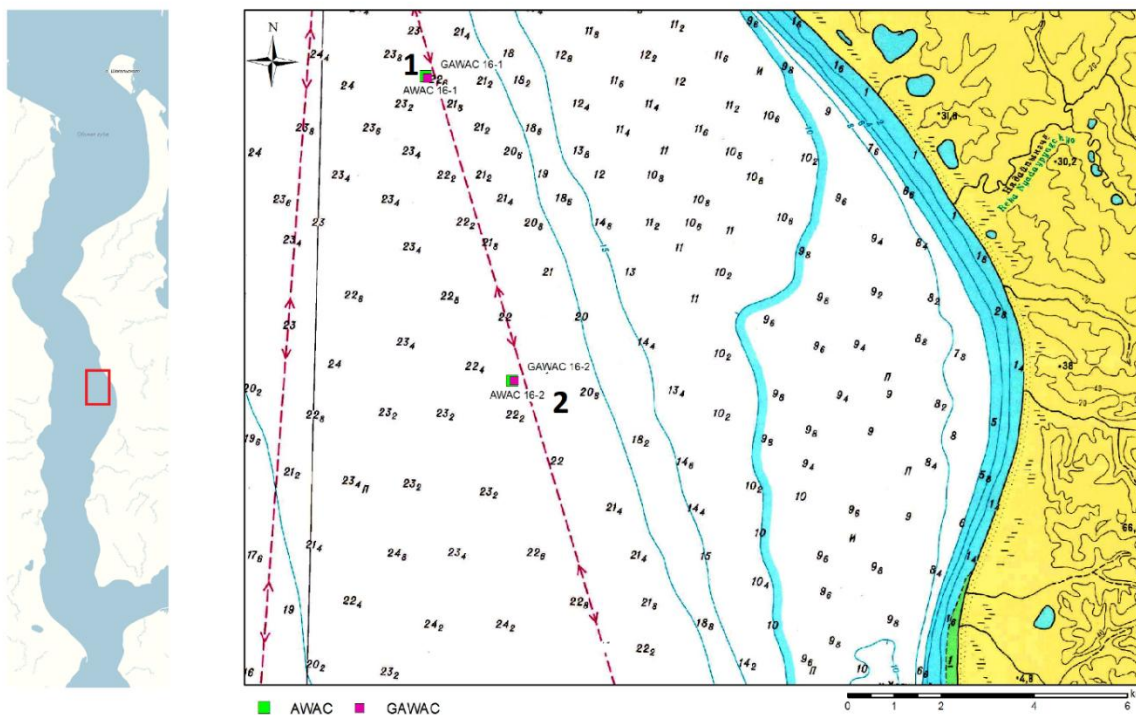


Рисунок 3.1 – Расположение станций АДС на Салмановском месторождении

В итоге, полученные данные из модели Delft3D можно сравнить с натурными данными и получить тем самым качественную оценку. Для начала сравним изменение уровня воды на двух станциях за расчетный период.

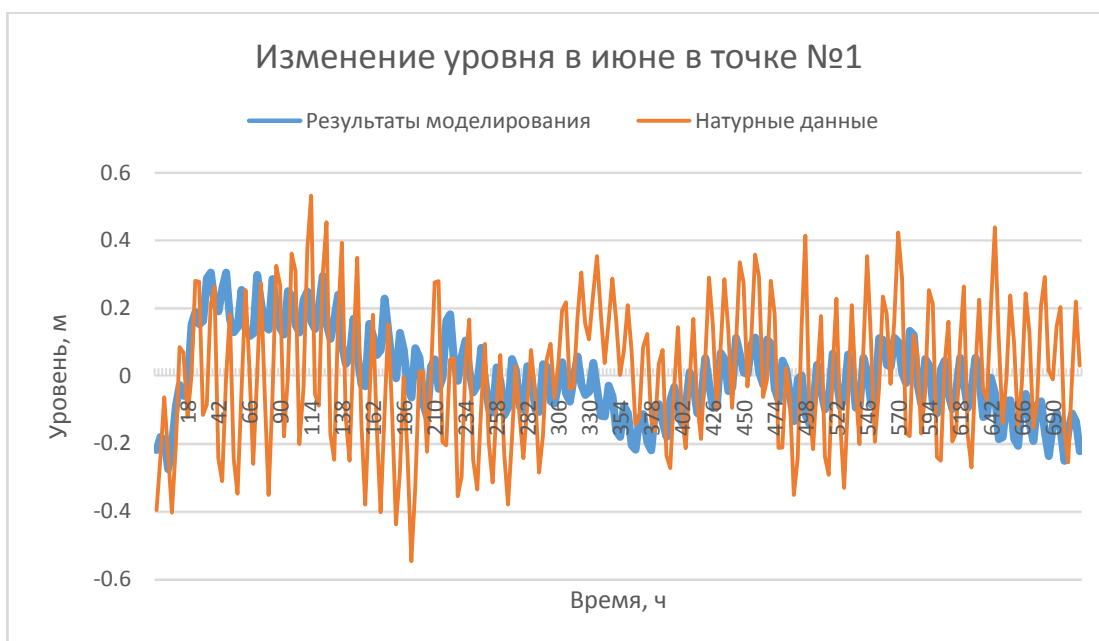


Рисунок 3.2 – Изменение уровня воды в июне 2016 года в точке 1

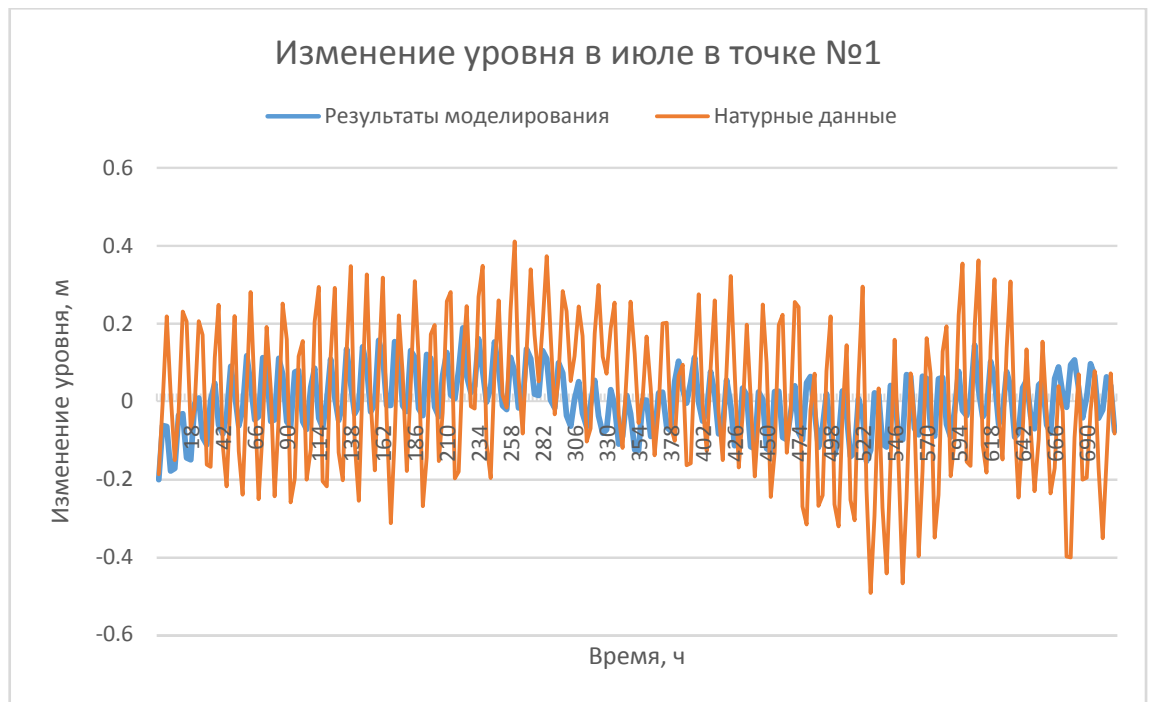


Рисунок 3.3 – Изменение уровня в июле 2016 года в точке 1

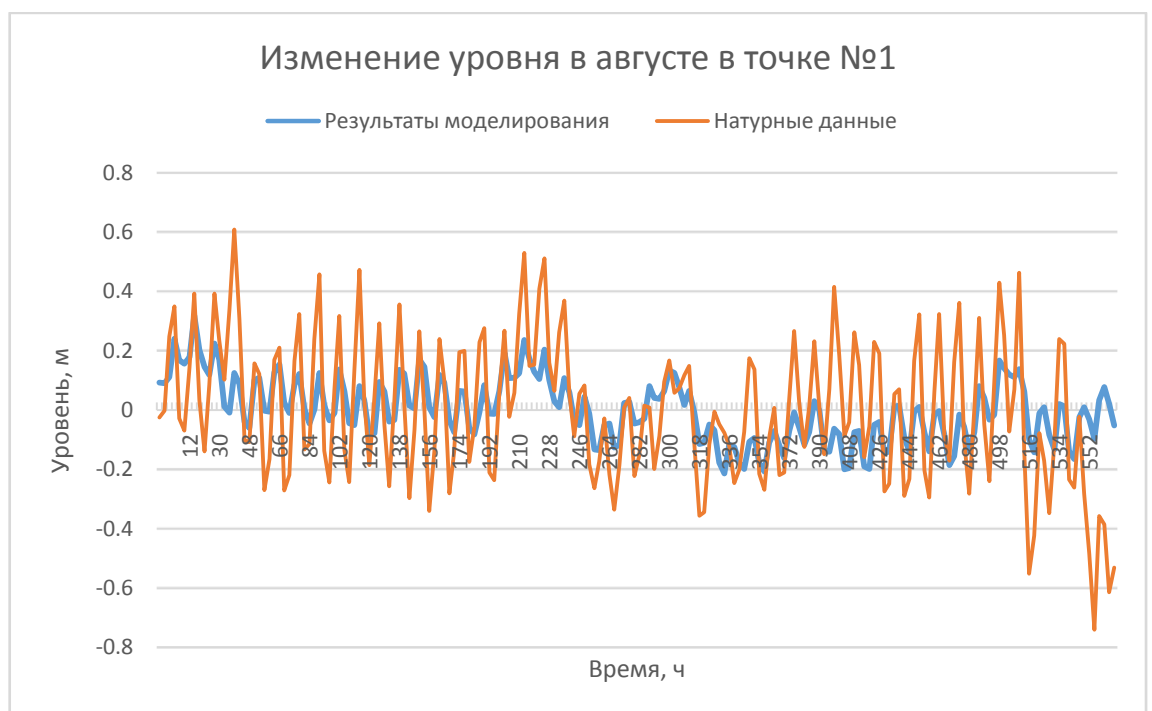


Рисунок 3.4 – Изменение уровня в августе 2016 года в точке 1

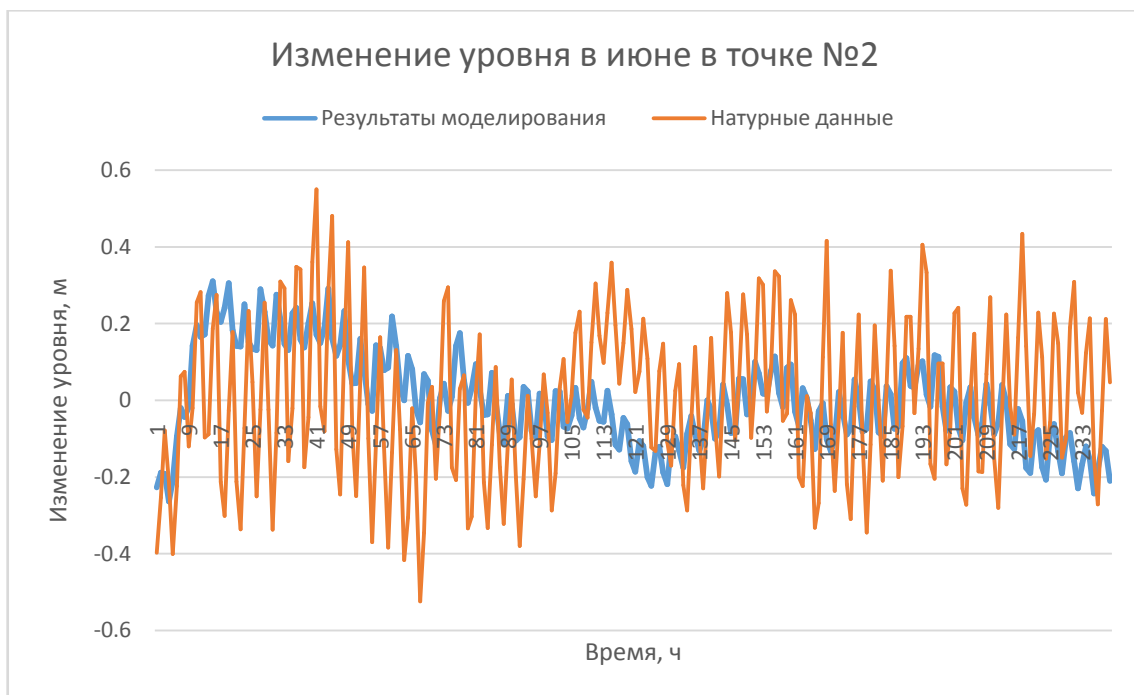


Рисунок 3.5 – Изменение уровня воды в июне 2016 года в точке 2

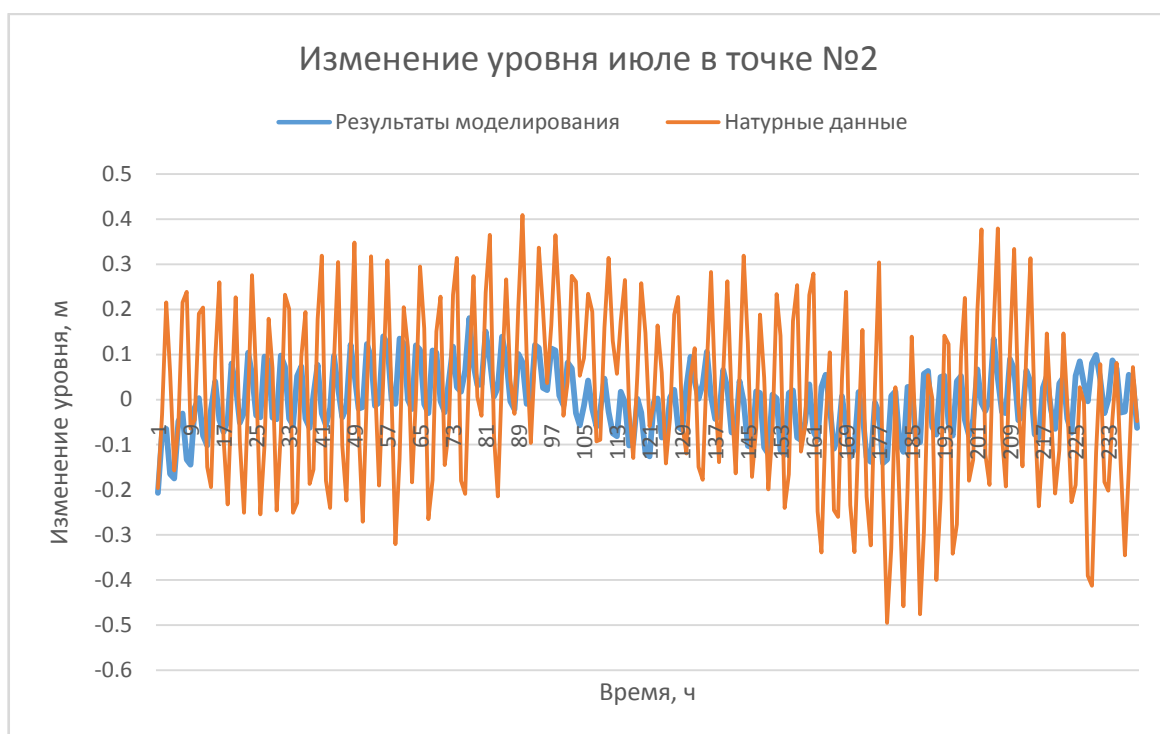


Рисунок 3.6 – Изменение уровня воды в июле 2016 года в точке 2

Из графиков 3.2 – 3.6 можно увидеть, что полученные в результате моделирования данные хорошо повторяют изменчивость уровня воды относительно натуральных данных на обеих станциях. Амплитуда рассчитанных

значений меньше, чем у данных, полученных со станций AWAC. Это может быть связано с недостаточным количеством входных параметров, которые влияют на уровень, особенно на открытых границах.

Так же ниже на рисунках 3.7-3.8 можно увидеть изменение уровня воды на всей акватории за 1 сутки с 0 часов 7 июня по 0 часов 8 июня с шагом по времени 6 часов.

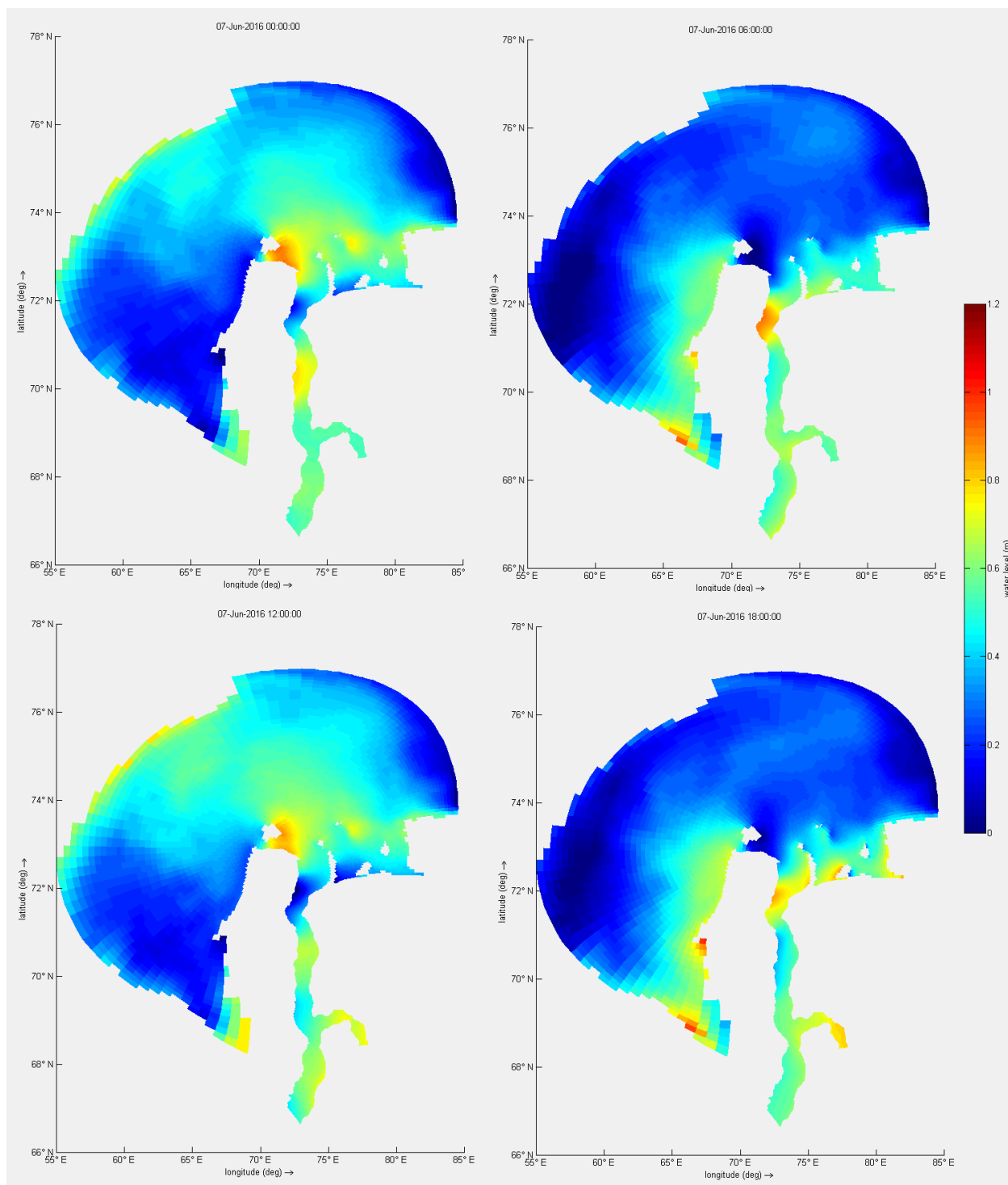


Рисунок 3.7 – Изменение уровня с 0 до 18 часов 7 июня

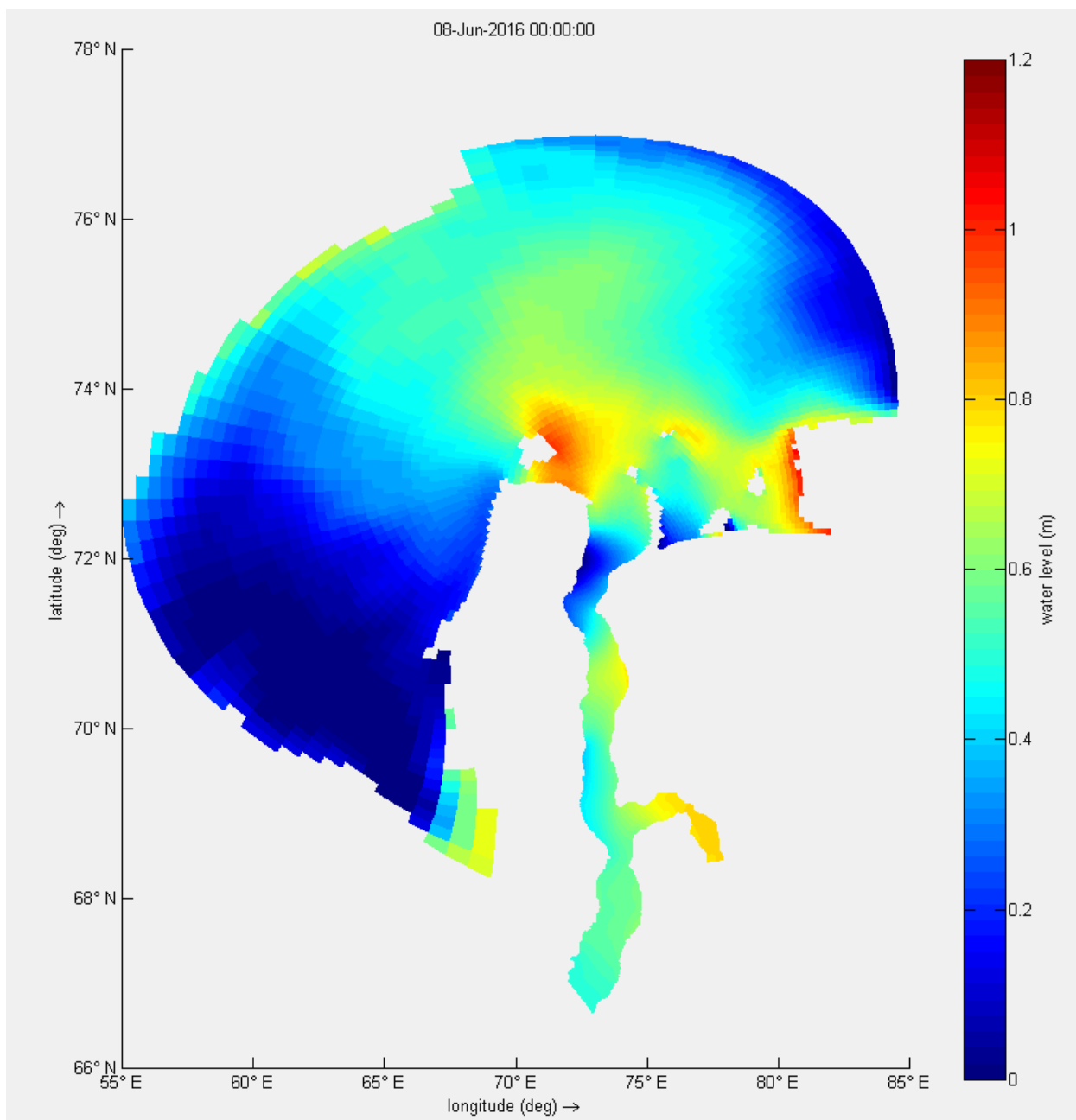


Рисунок 3.8 – Уровень воды в 0 часов 8 июня

Из этих рисунков можно увидеть, как происходит изменение уровня воды за счет приливной волны, которая идет с открытой границы в Карском море. Дойдя до острова Белый, она разделяется на две части, одна из которых идет в Байдарацкую губу, а другая в Обскую и Гыданскую губу, тем самым влияя и на уровень Тазовской губы. Таким образом можно заметить, что именно приливные волны больше всего влияют на изменение уровня воды в данной акватории.

Далее рассмотрим направления и скорости течений на горизонтах 1 и 7.5 метров. Так как картины в точках 1 и 2 очень похожи, то ниже будут представлены данные только для первой точки.

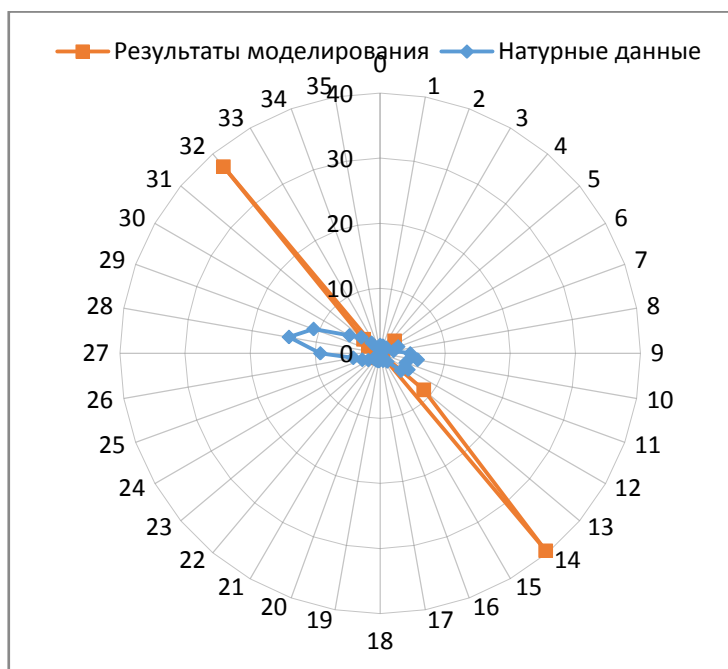


Рисунок 3.9 – Повторяемость направлений течения в точке 1 в июне в подповерхностном слое (%)

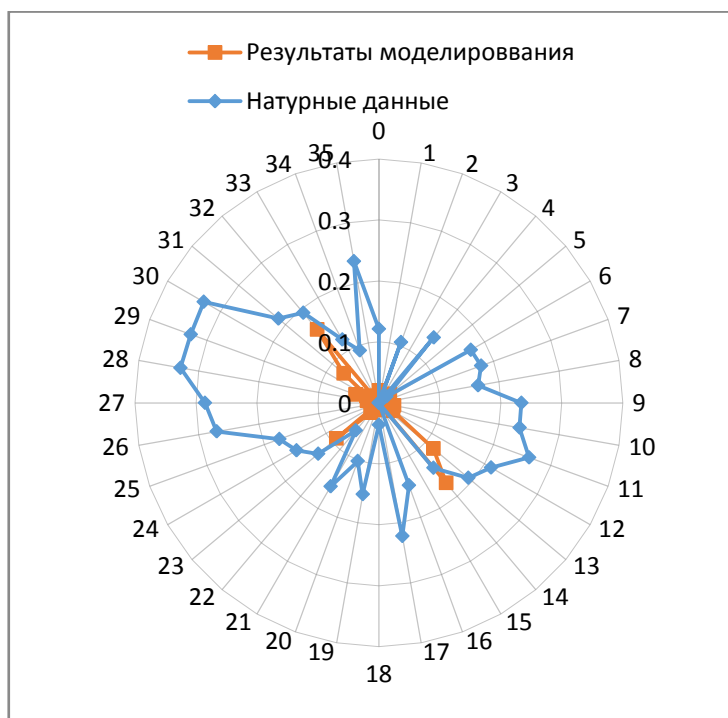


Рисунок 3.10 – Распределение скоростей течения в точке 1 в июне в подповерхностном слое (м/с)



Рисунок 3.11 – Повторяемость направлений течения в точке 1 в июле в подповерхностном слое (%)

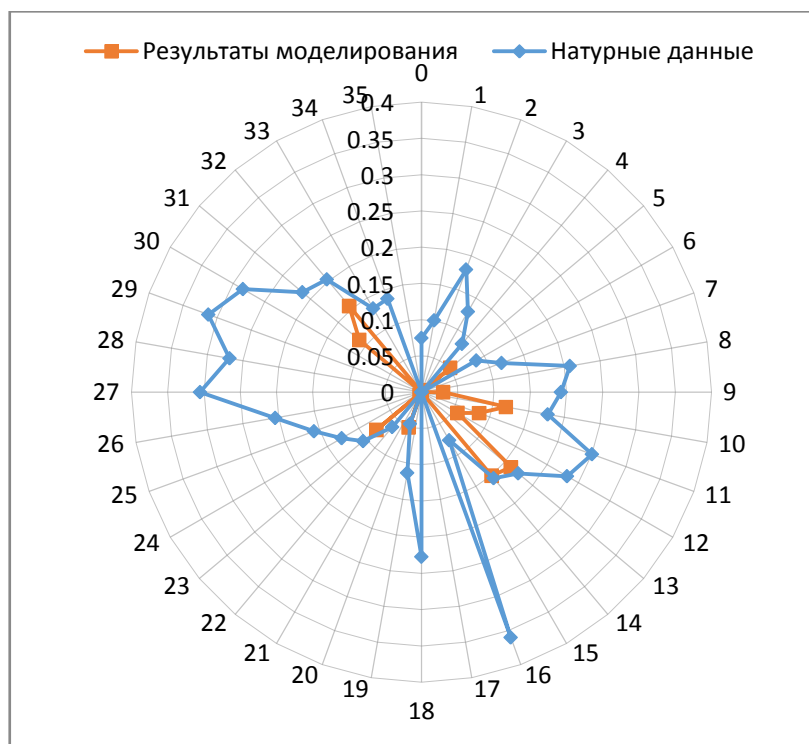


Рисунок 3.12 – Распределение скоростей течения в точке 1 в июле в подповерхностном слое (м/с)

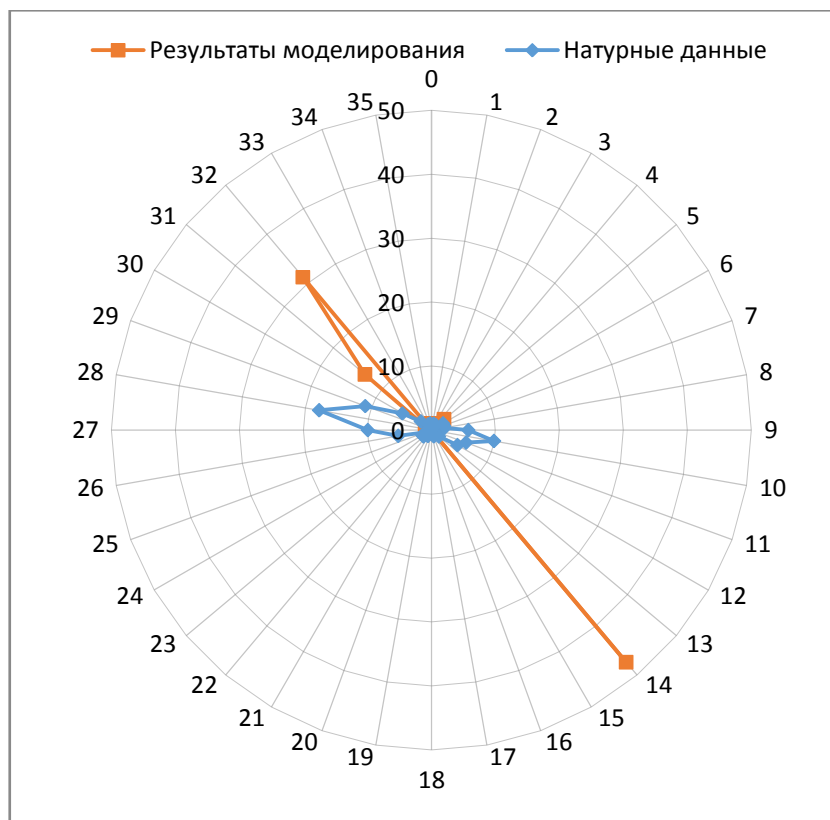


Рисунок 3.13 – Повторяемость направлений течения в точке 1 в августе в подповерхностном слое (%)

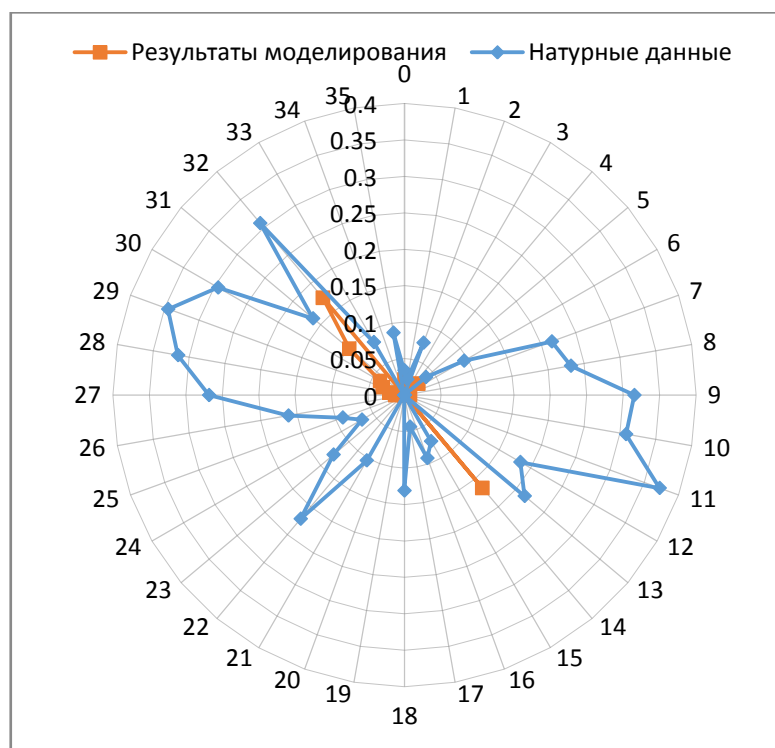


Рисунок 3.14 – Распределение скоростей течения в точке 1 в августе в подповерхностном слое (м/с)

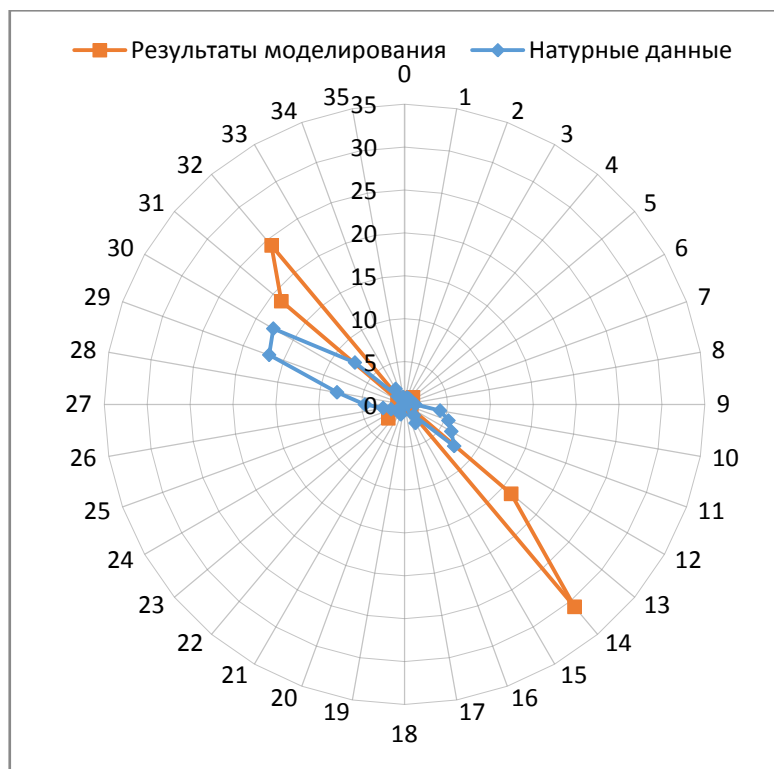


Рисунок 3.15 – Повторяемость направлений течения в точке 1 в июне на горизонте 7.5 метров (%)

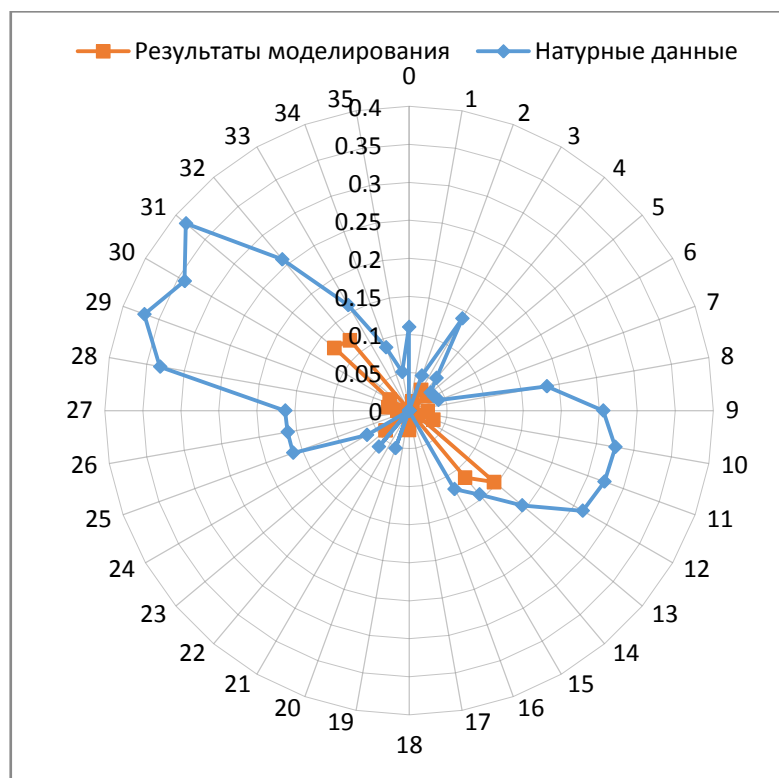


Рисунок 3.16 – Распределение скоростей течения в точке 1 в июне на горизонте 7.5 метров (%)

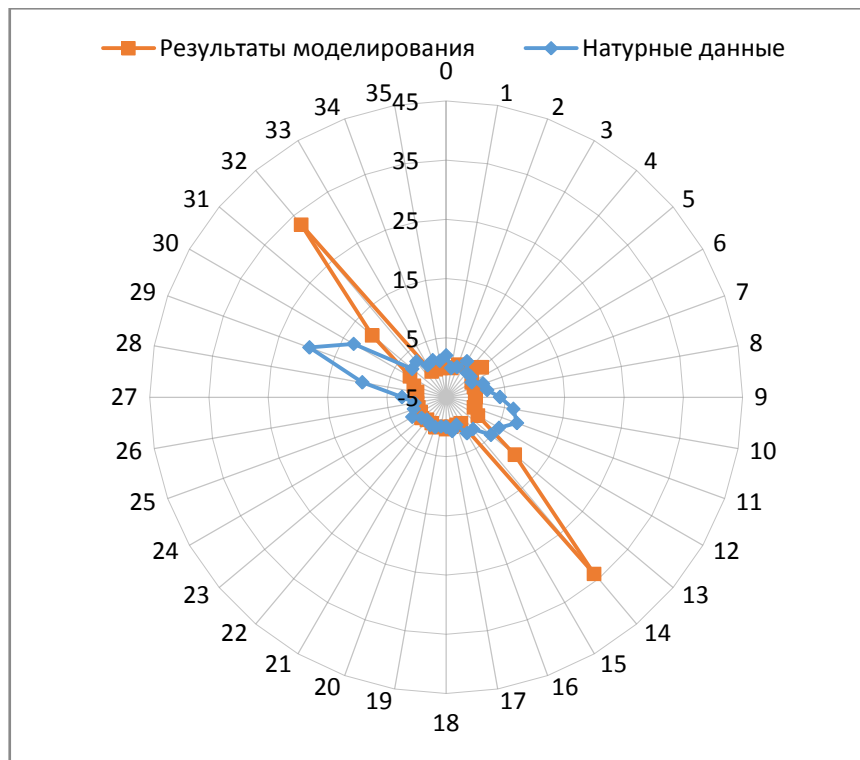


Рисунок 3.17 – Повторяемость направлений течения в точке 1 в июле на горизонте 7.5 метров (%)

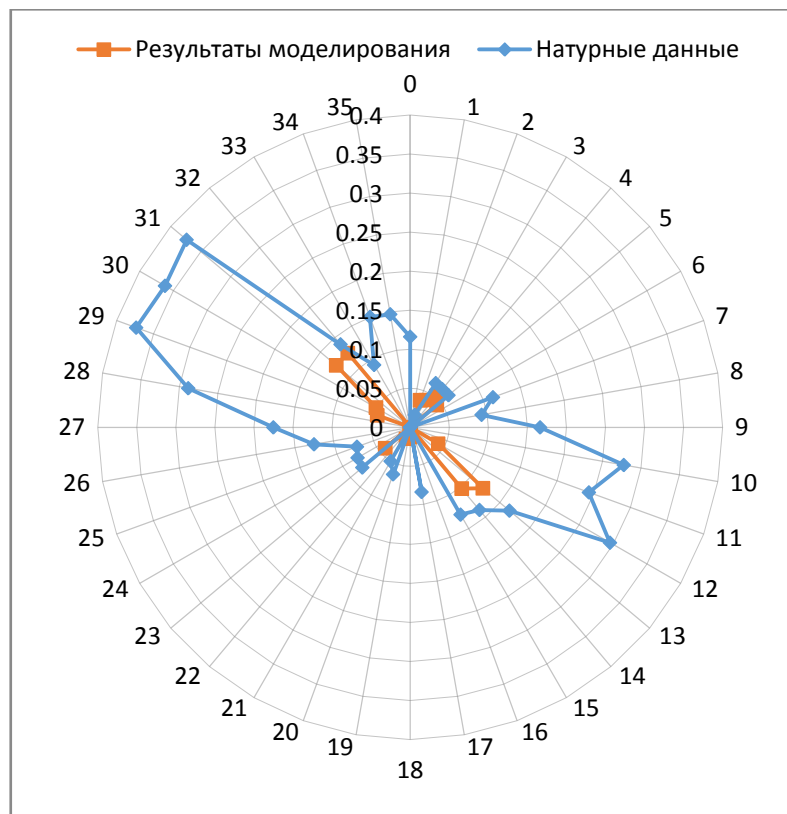


Рисунок 3.18 – Распределение скоростей течения в точке 1 в июле на горизонте 7.5 метров (%)



Рисунок 3.19 – Повторяемость направлений течения в точке 1 в августе на горизонте 7.5 метров (%)

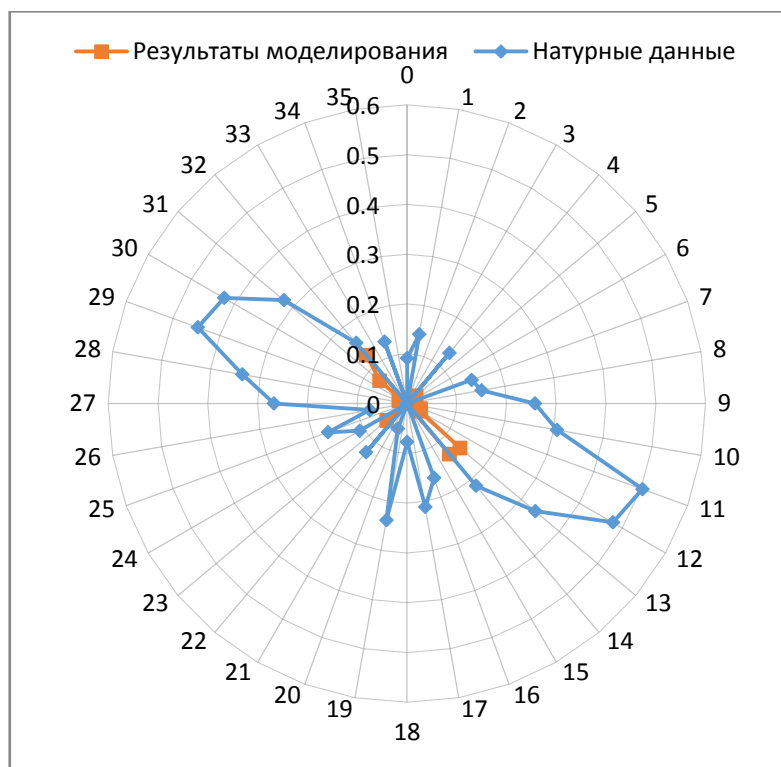


Рисунок 3.20 – Распределение скоростей течения в точке 1 в августе на горизонте 7.5 метров (%)

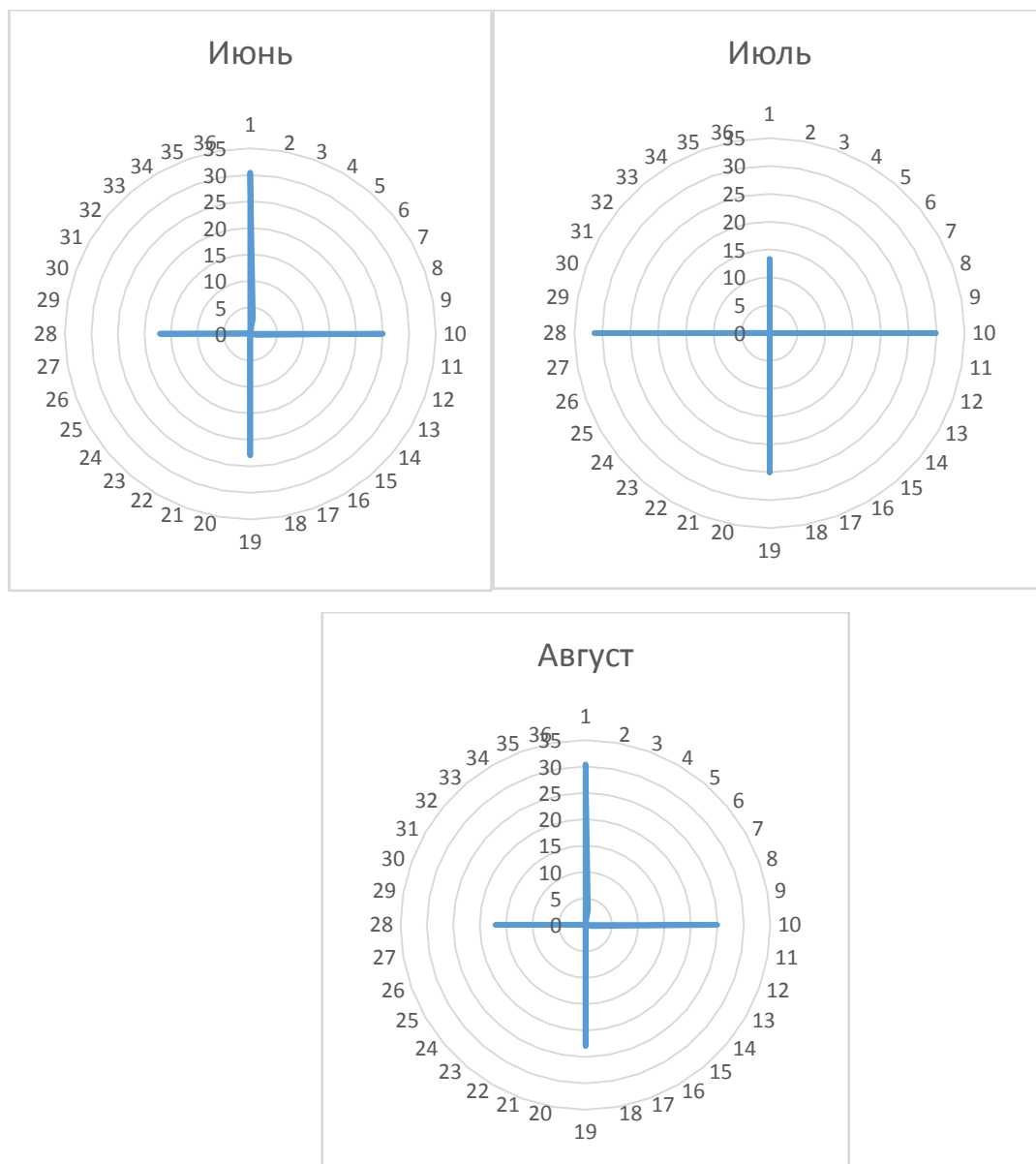


Рисунок 3.21 – Повторяемость направления ветра в июне, июле и августе 2016 года в точке 1 (%)

Из полученных результатов (см. рис. 3.9-3.20) можно увидеть, что течения имеют именно такое направление в следствии ветра и действия приливных сил. Модель довольно хорошо описала направление течений, хоть и с меньшим разбросом. Скорости течений, полученные в результате моделирования, на подповерхностном горизонте отличаются от фактических значений. Это может быть связано из-за не очень точных данных по батиметрии выбранного района, так как шаг исходных данных с глубинами довольно большой, по сравнению с шагом расчетной сетки.

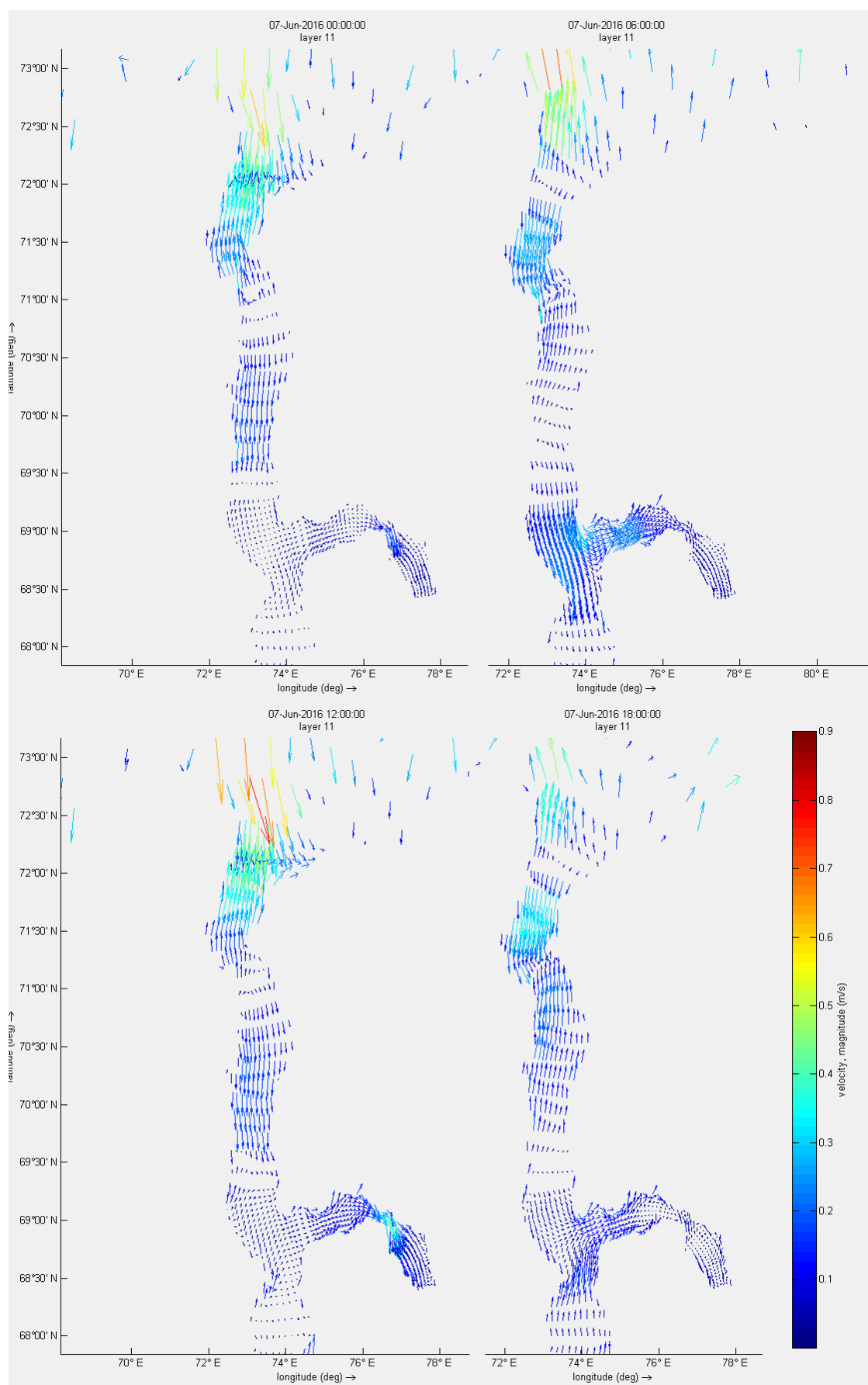


Рисунок 3.22 – Течения в подповерхностном слое в Обской губе с 0 до 18 часов
7 июня

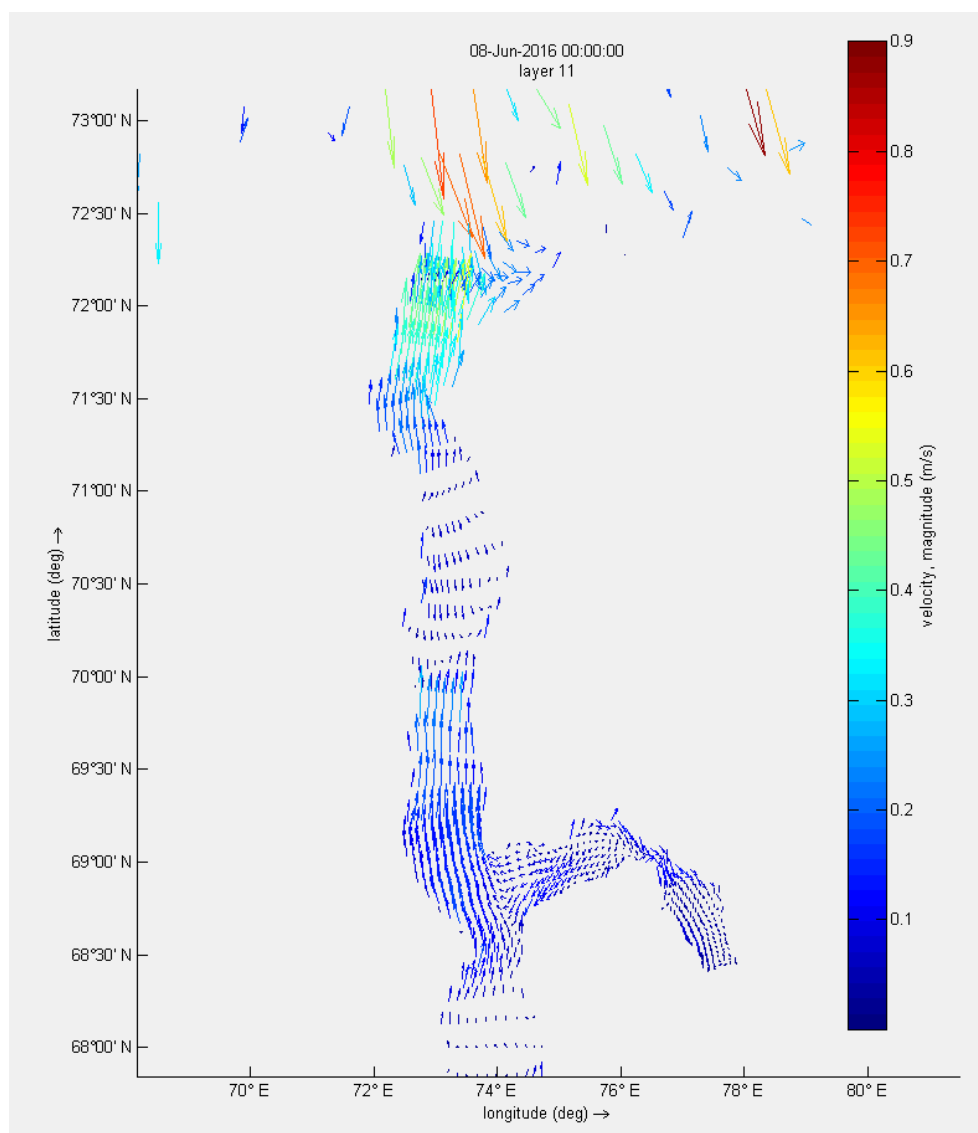


Рисунок 3.23 – Течения в подповерхностном слое в Обской губе в 0 часов 8 июня

Из рисунков 3.22 – 3.23 так же видно, что течения имеют приливной характер.

В приложении 1 можно найти карты течений, скорость и направление ветра на всей расчетной акватории, включая Карское море. Также в приложении 2 имеются карты из навигационного атласа течений Обской губы. По ним можно увидеть суммарные течения в поверхностном слое при штиле и устойчивом состоянии уровня.

В самой Обской и Тазовской губе уровень меняется в пределах не больше полуметра. Максимальная скорость течения наблюдается на входе в Обскую губу. Здесь она может достигать значения 1 м/с. Далее ближе к Тазовской губе и в ней самой скорости имеют более низкие значения, примерно в два-три раза.

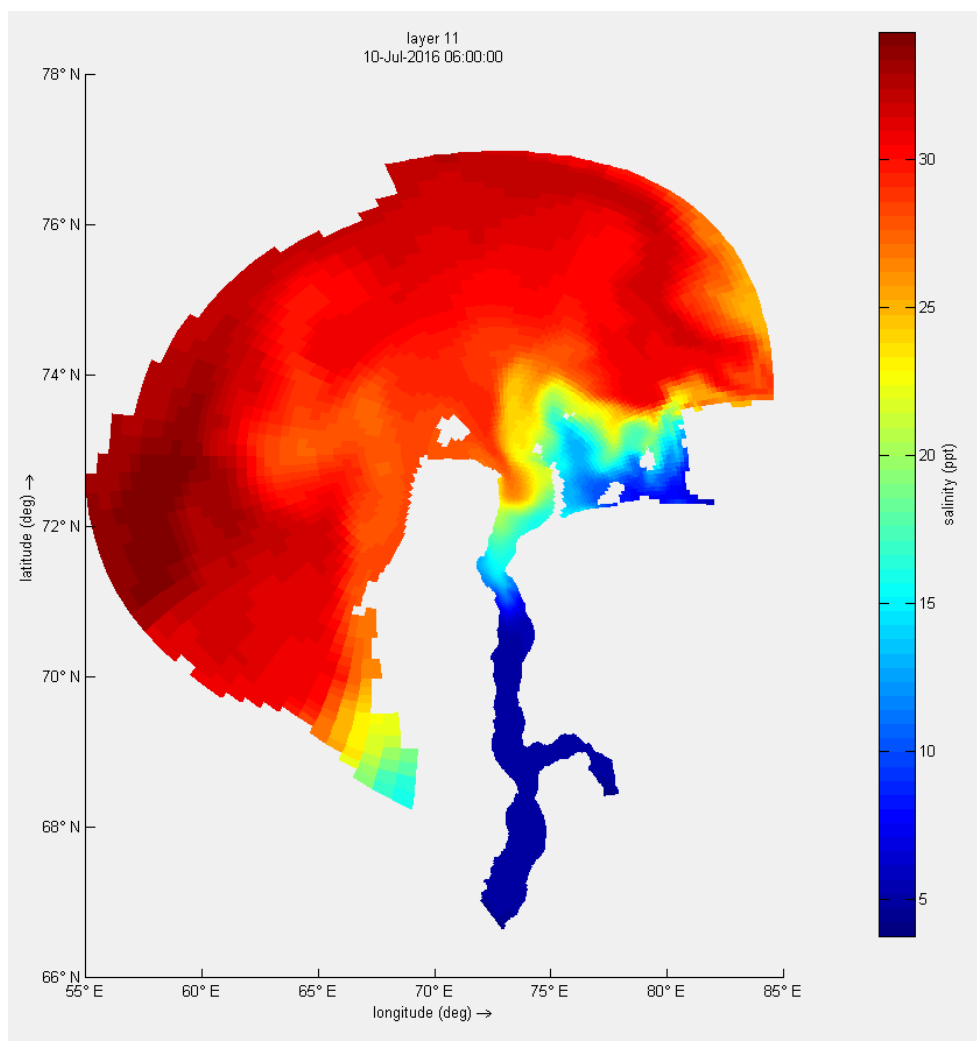


Рисунок 3.24 – Соленость в подповерхностном слое в июле

Летом наблюдаются высокие градиенты солености как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Существует сильная стратификация (см. рис. 3.24). Зона смешения расположена между 72,25 и 72,5°с.ш.

Соленость в Обской и Тазовской губе практически не меняется. Это связано с тем, что в модели не учитываются осадки и отсутствуют речные стоки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы была рассмотрена гидродинамическая модель Delft3D и возможность ее использования для моделирования гидродинамической обстановки акватории Обской губы.

В начале модель была установлена и проверена на работоспособность. Далее были подготовлены все необходимые для расчета метеорологические данные, а также граничные и начальные условия.

Период расчета был выбран с 15 мая по 31 августа 2016 года. В итоге были получены данные по изменению уровня воды, скоростям и направлению течений, а также солёности и построены карты распределения этих характеристик. Что касается распределения температур, уравнение состояния морской воды показывает, что влияние температуры на плотность морской воды незначительно по сравнению с солёностью. Более того, чувствительность плотности морской воды к колебаниям температуры уменьшается со снижением фоновой температуры. Как следствие, приоритет в моделировании отдается солёности, а тепловое рассеивание не было смоделировано в этом исследовании.

Результат был сравнен с натурными данными, которые были получены в ходе экспедиции в Обской губе, в рамках которой были установлены донные автономные донные станции с приборами AWAC в районе Салмановского месторождения.

Таким образом, при сравнении полученных и натурных данных, был сделан вывод, что модель хорошо справляется со своими задачами. Больше всего на изменение уровня воды в Обской губе влияют приливообразующие силы и воздействие ветра. В итоге, изменение уровня моря достаточно похоже на естественное. Направления течения на разных горизонтах так же имеют довольно близкие значения к натурным данным. Скорости же течений отличаются сильнее.

Для более лучшего решения модели, нужно использовать батиметрию с более мелким шагом, чтобы точнее повторить изгибы дна, а также задать речной сток на некоторых открытых границах.

В итоге, поставленная задача была выполнена. Представленная вычислительная модель хорошо моделирует общую гидродинамическую картину распределения, наблюдаемую в данной акватории. Адаптация на выбранный участок была проведена успешно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гидрологический режим Карского моря [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа: www.aari.ru/resources/a0013_17/kara/Atlas_Kara_Sea_Winter/text/rejim. - русский язык.- дата обращения: (16.05.2017).
2. Дианский Н.А., Фомин В.В., Грузинков В.М., Кабатченко И.М., Литвиненко Г.И. Оценка влияния подходного канала к порту Сабетта на изменение гидрологических условий Обской губы с помощью численного моделирования // Арктика: экология и экономика. - 2015. - №3 (19). - С. 18-29.
3. Доронин Ю. П. Физика океана. - СПб: изд. РГГМУ, 2000. - 340 с.
4. Лапин С. Гидрологическая характеристика Обской губы в летнее и осеннее время года. // Океанология. - 2011. - №51(6). - С. 984-993.
5. Лапин С.А. Пространственно-временная изменчивость гидрологических и гидрохимических характеристик Обского залива как основа оценки его биопродуктивности.: автореф. дис. ... канд. геогр. - Москва, 2012. - 25 с.
6. Лисицын А.Р. Маргинальный фильтр океана // Океанология. - 1995. - №34 (5). - С. 671-682.
7. РБО на создание рыбоохранной заповедной зоны [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа: www.gosrc.ru/rzz_obskaia_gubax.pdf. - русский язык.- (дата обращения: 07.04.2015).
8. Фёдоров М.К. Гидрометеорологический режим Обской губы и дельты р.Оби/ дис.: Ленинград, 1948.
9. ЭРСП по гидрометеорологическому режиму Карского моря [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа: nodc.meteo.ru/ERSP/atlaskarsk/opis_reg. - русский язык.- дата обращения: (15.05.2017).

10. About Delft3D [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа: oss.deltares.nl/web/delft3d/about.- английский язык.- дата обращения: (10.01.2017).
11. Arakawa, A.; Lamb, V.R. (1977). "Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model". Methods of Computational Physics. 17. New York: Academic Press. pp. 173–265.
12. Deltares, 2014. Delft3D-FLOW User Manual (Version: 3.15 Revision: 36498), Delft, The Netherlands
13. ERA Interim, Daily [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа: apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/.- английский язык.- дата обращения: (16.02.2017).
14. GEBCO [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа: gebco.net.- английский язык.- дата обращения: (15.02.2017).
15. NOAA World Ocean Atlas Select [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа: www.nodc.noaa.gov/OC5/SELECT/woaselect/woaselect.html.- английский язык.- дата обращения: (17.02.2017).
16. Octavio, K. A. H., G. H. Jirka and D. R. F. Harleman, 1977. Vertical Heat Transport Mechanisms in Lakes and Reservoirs. Tech. Rep. 22, Massachusetts Institute of Technology.
17. Volkov VA, Johannessen OM, Borodachev VE, Voinov GN, Petterson LH, Bobylev LP, Kouraev AV. 2002. Polar Seas Oceanography – An Integrated Case Study of the Kara Sea. Springer/Praxis Publishing.
18. WXTide32 [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа: www.wxtime32.com.- английский язык.- дата обращения: (18.02.2017).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

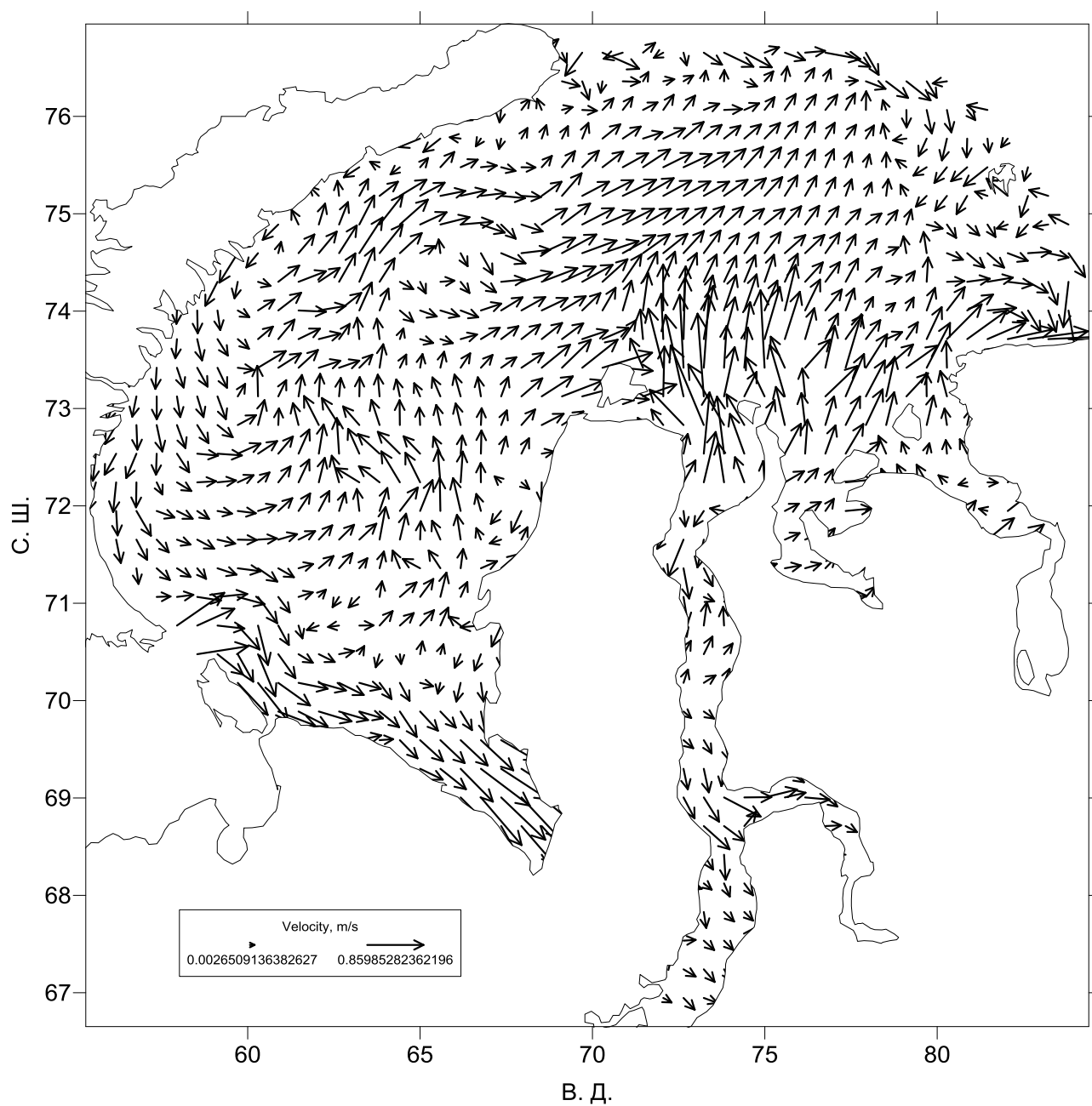


Рисунок 1 – Скорости направление течений в подповерхностном слое 7 июня 2016 года в 0 часов

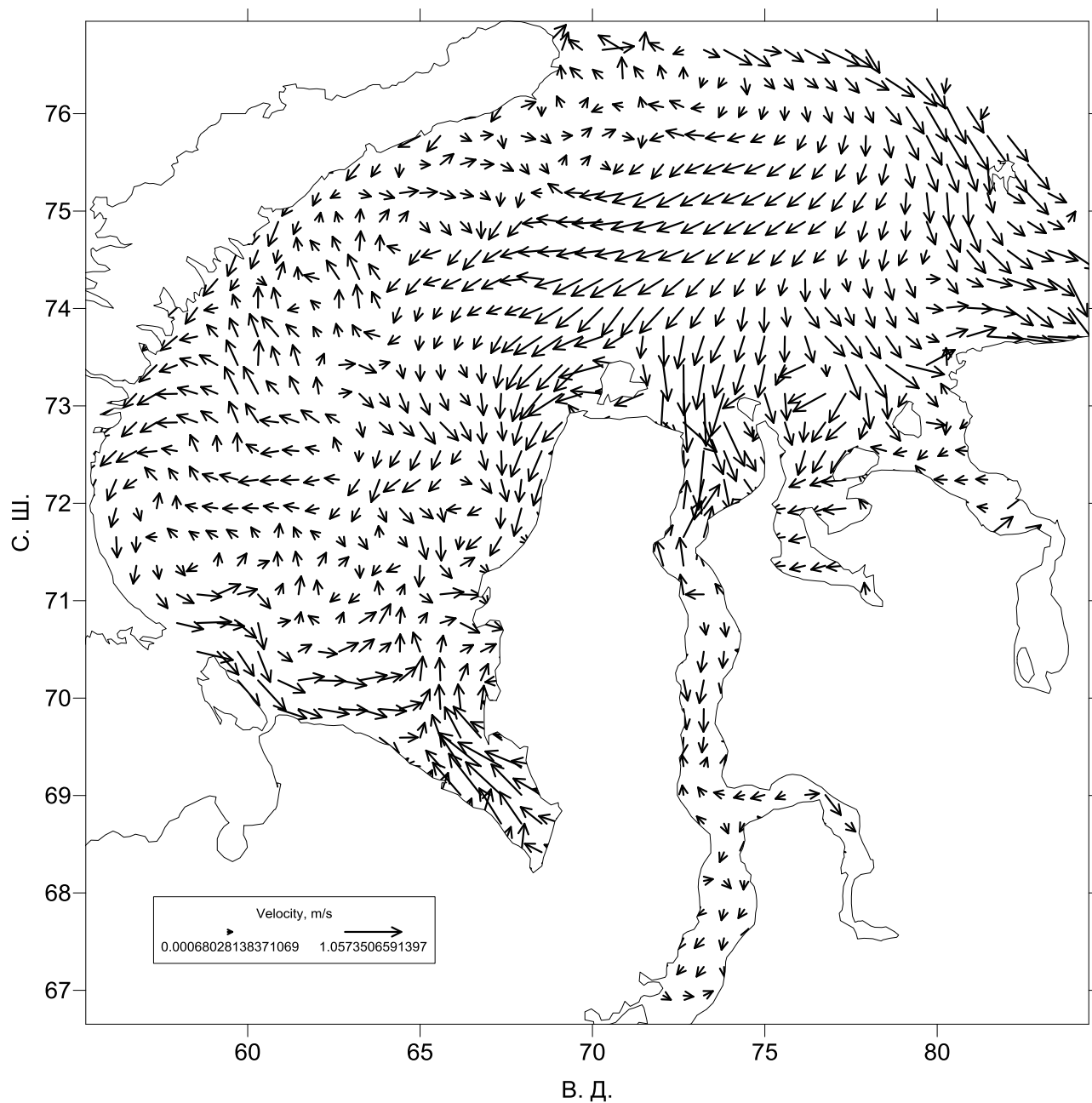


Рисунок 2 – Скорость и направление течений в подповерхностном слое 7 июня 2016 года в 6 часов

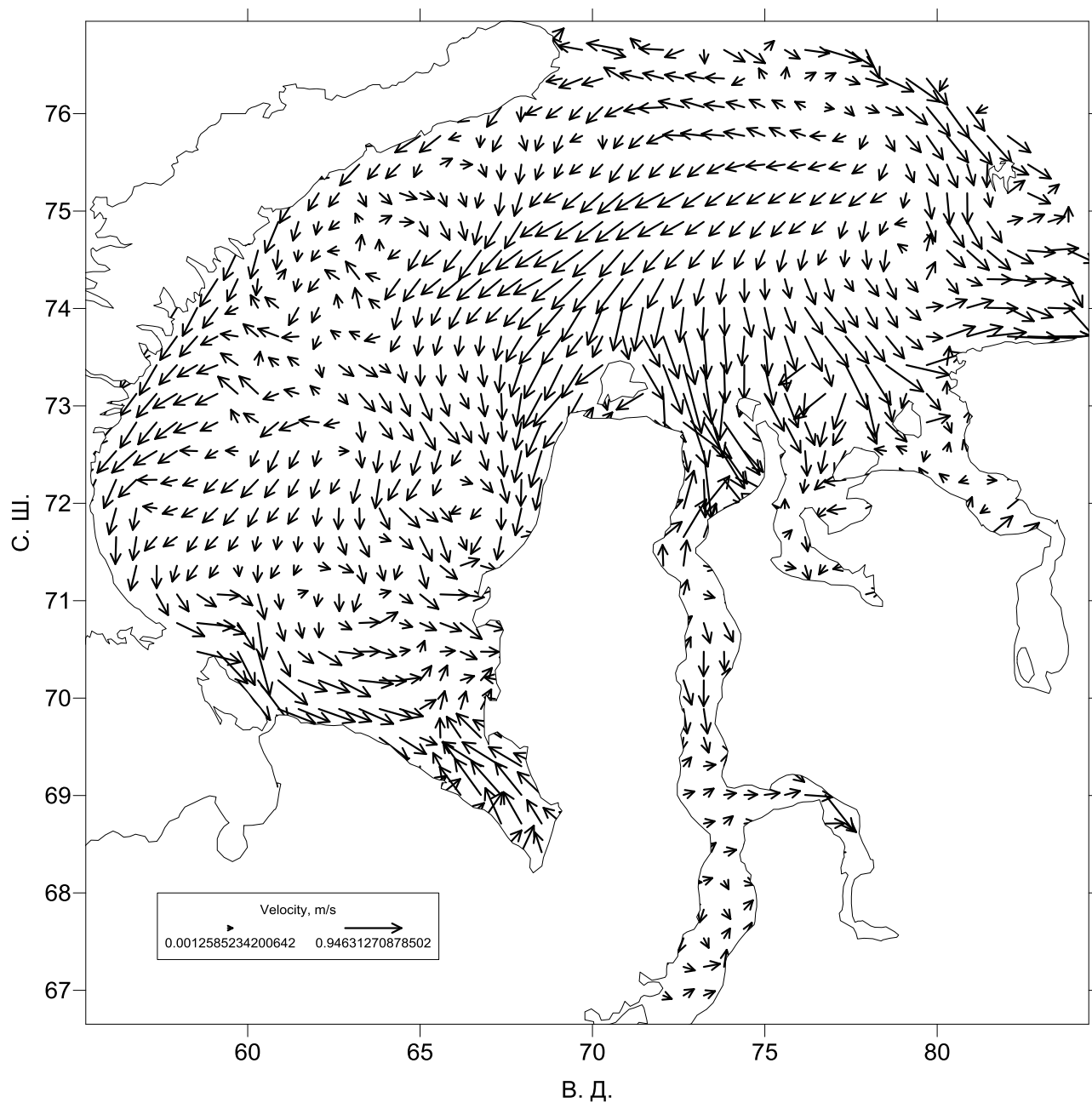


Рисунок 3 – Скорость и направление течений в подповерхностном слое 7 июня 2016 года в 12 часов

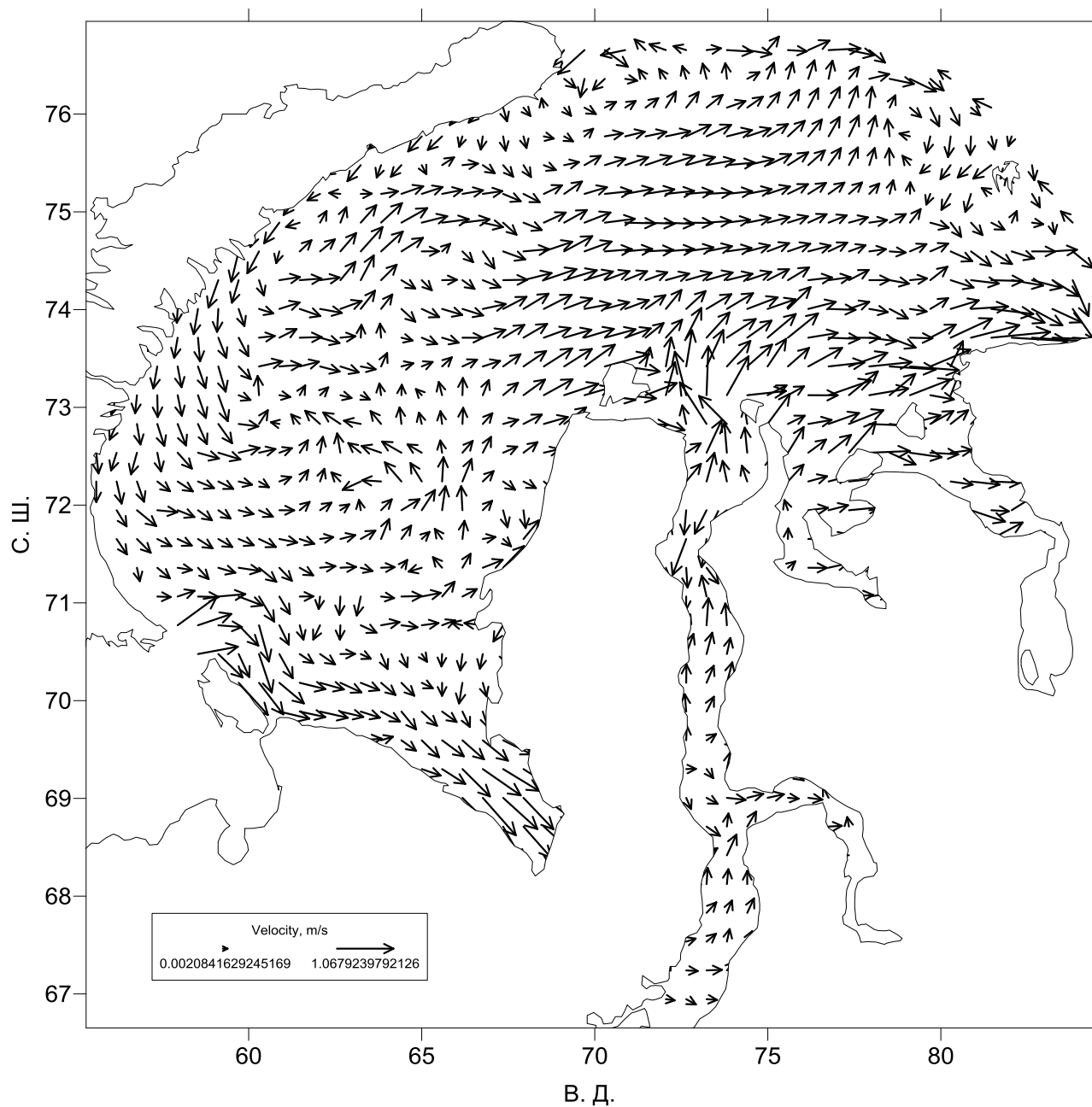


Рисунок 4 – Скорость и направление течений в подповерхностном слое 7 июня 2016 года в 18 часов

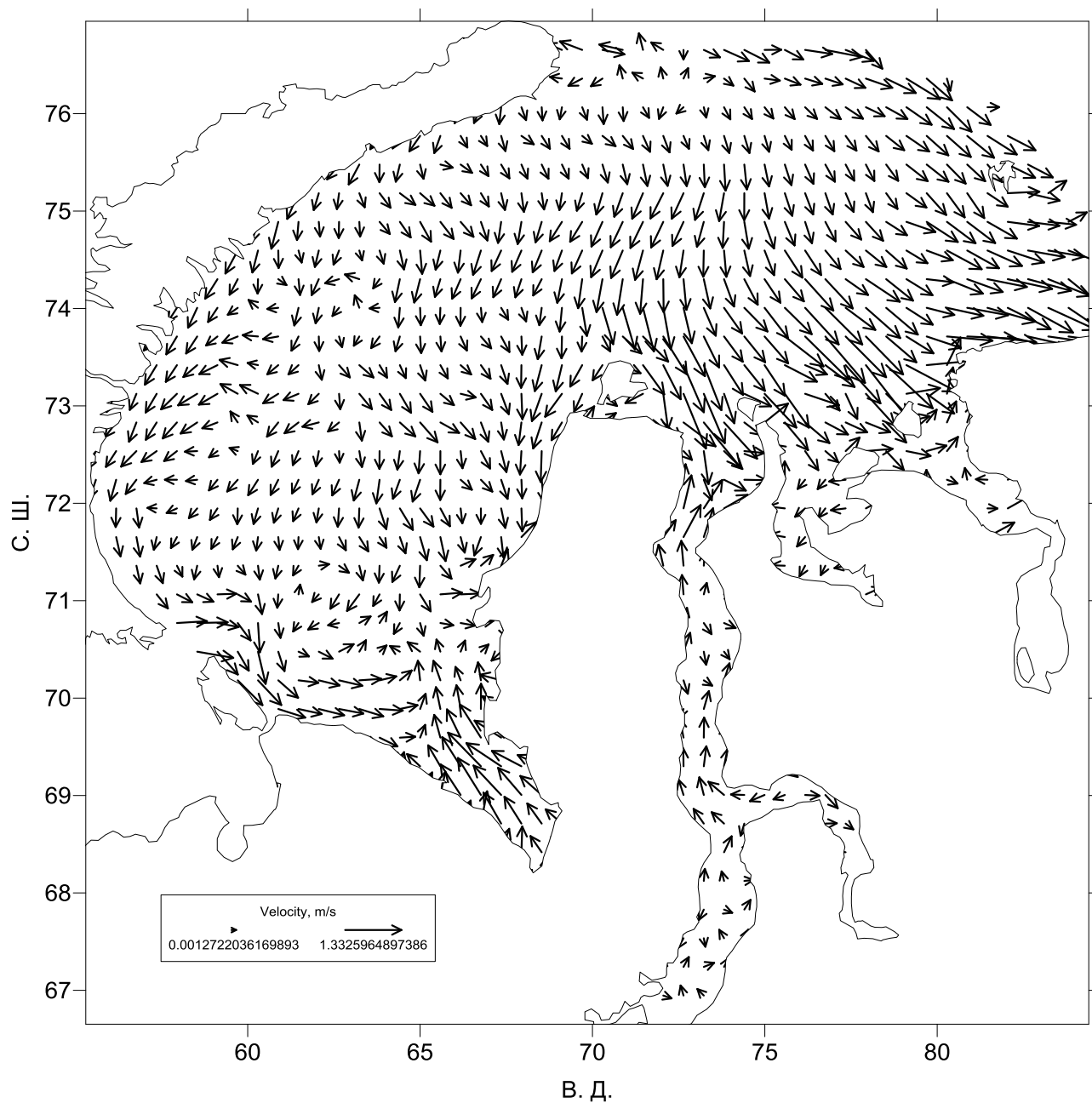


Рисунок 5 – Скорость и направление течений в подповерхностном слое 8 июня 2016 года в 0 часов

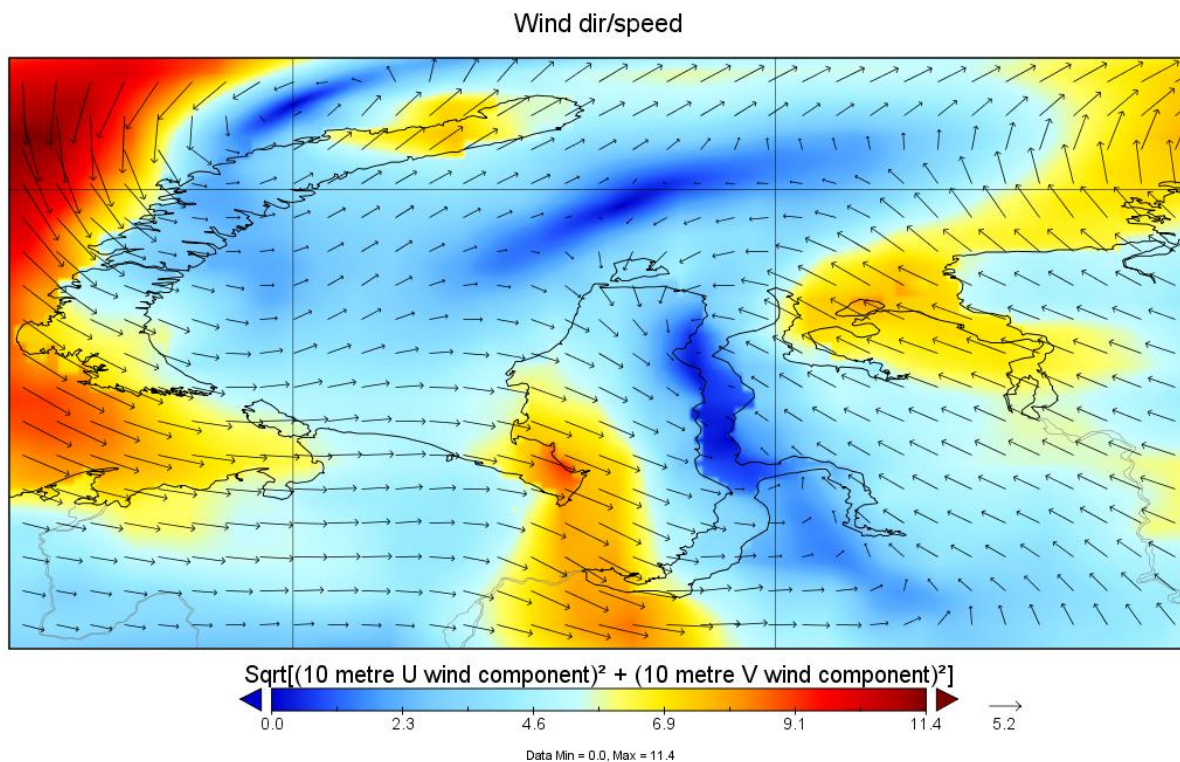


Рисунок 6 – Скорость и направление ветра 7 июня 2016 года в 0 часов

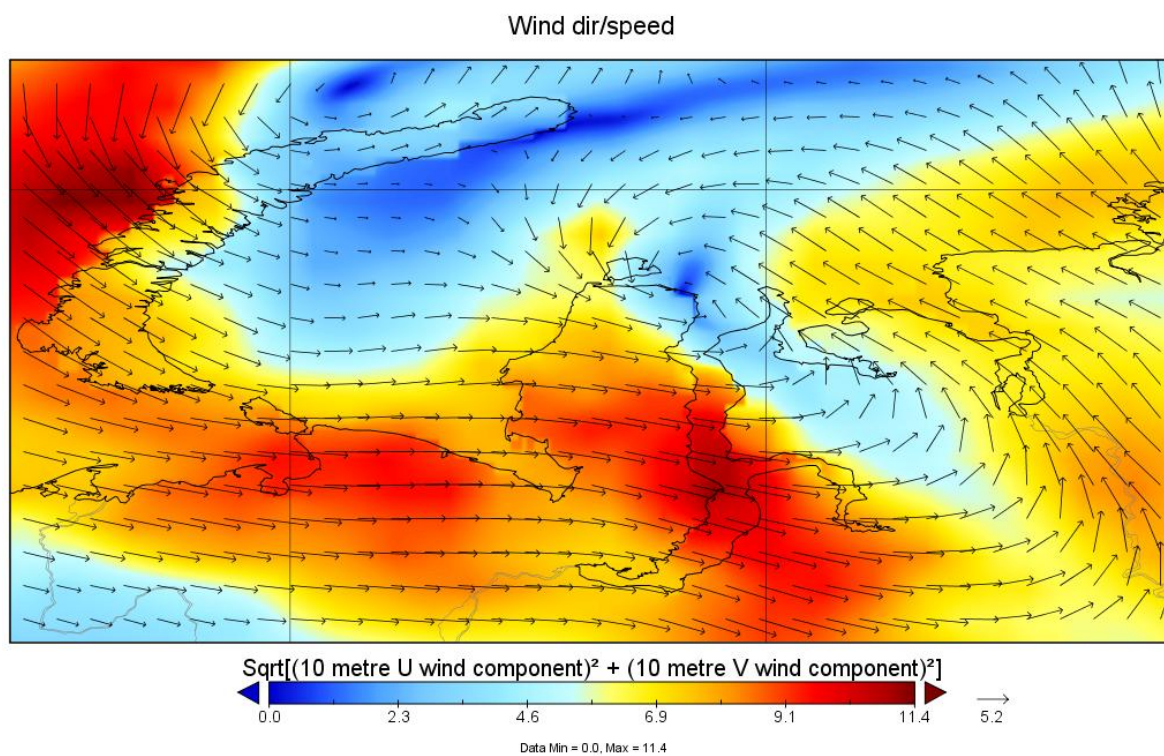


Рисунок 7 – Скорость и направление ветра 7 июня 2016 года в 6 часов

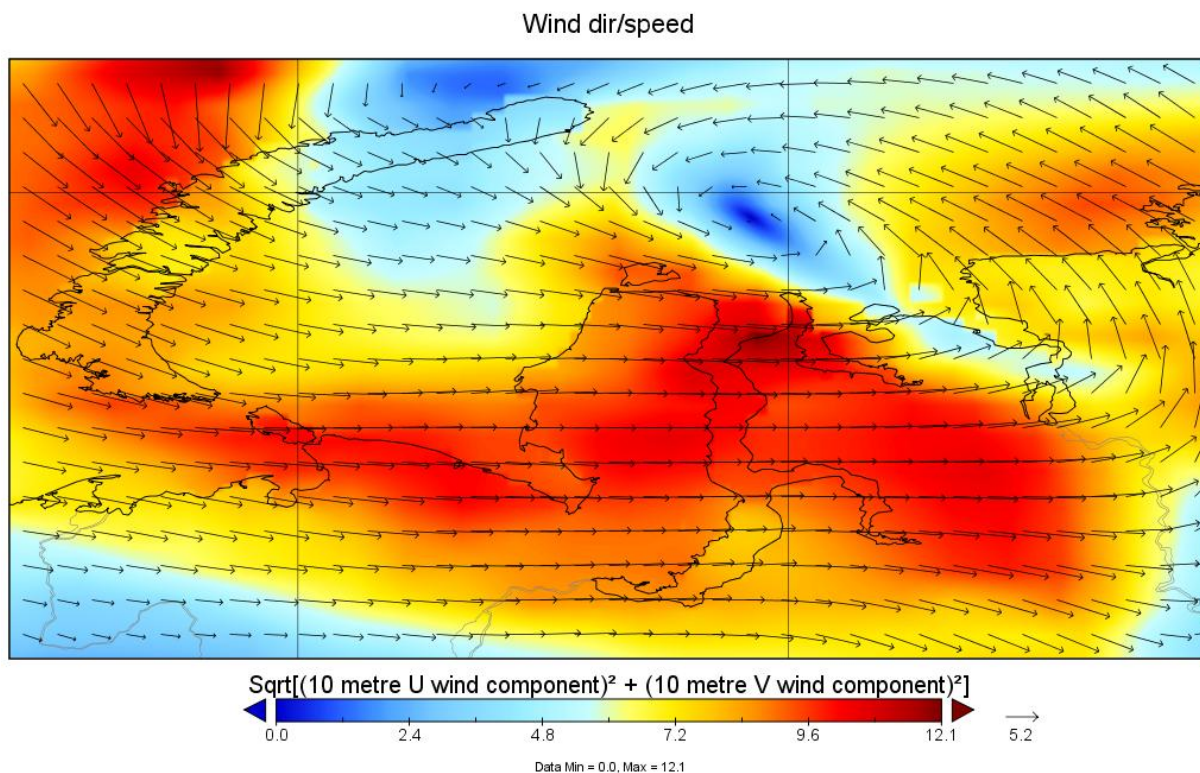


Рисунок 8 – Скорость и направление ветра 7 июня 2016 года в 12 часов

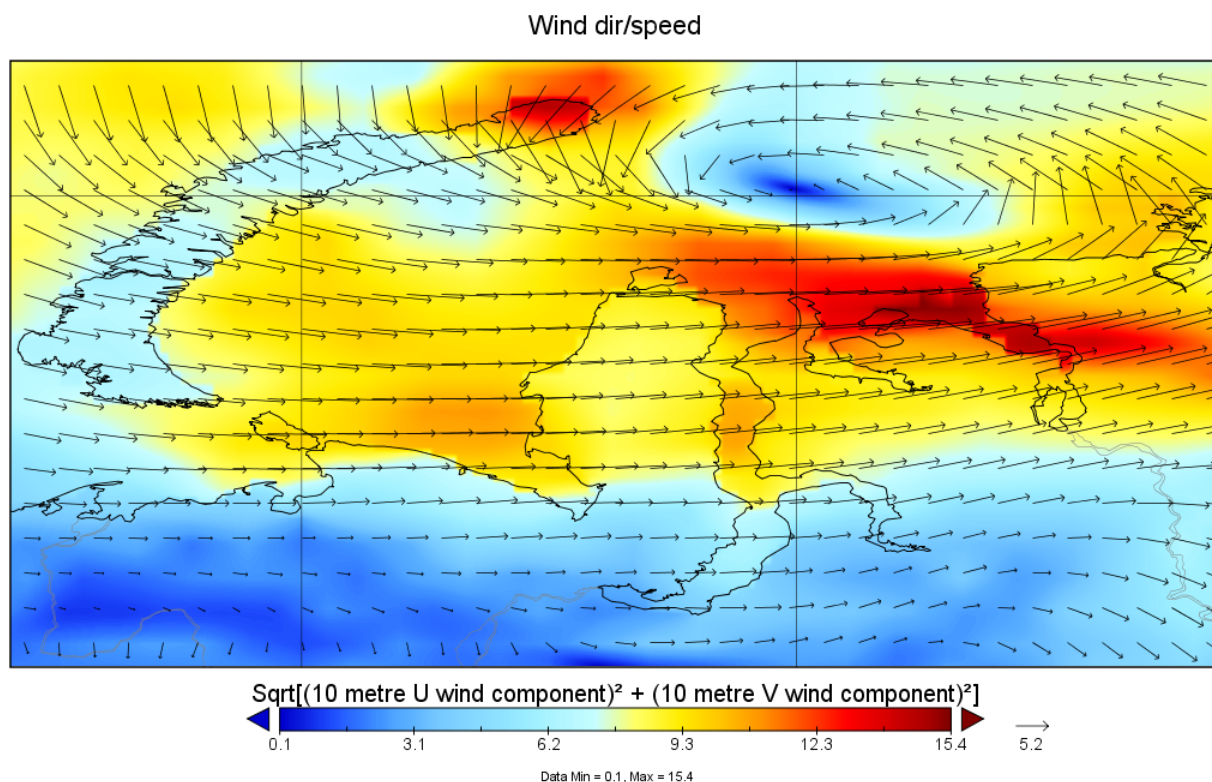


Рисунок 9 – Скорость и направление ветра 7 июня 2016 года в 18 часов

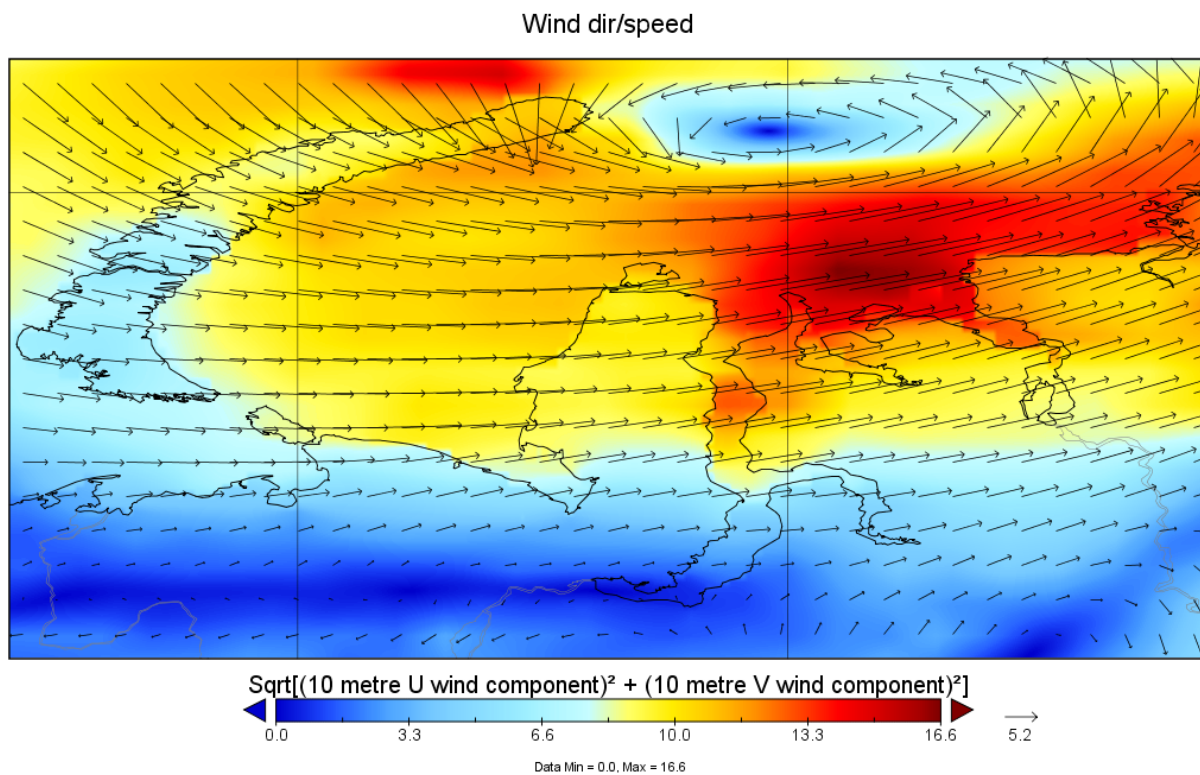


Рисунок 10 – Скорость и направление ветра 8 июня 2016 года в 0 часов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

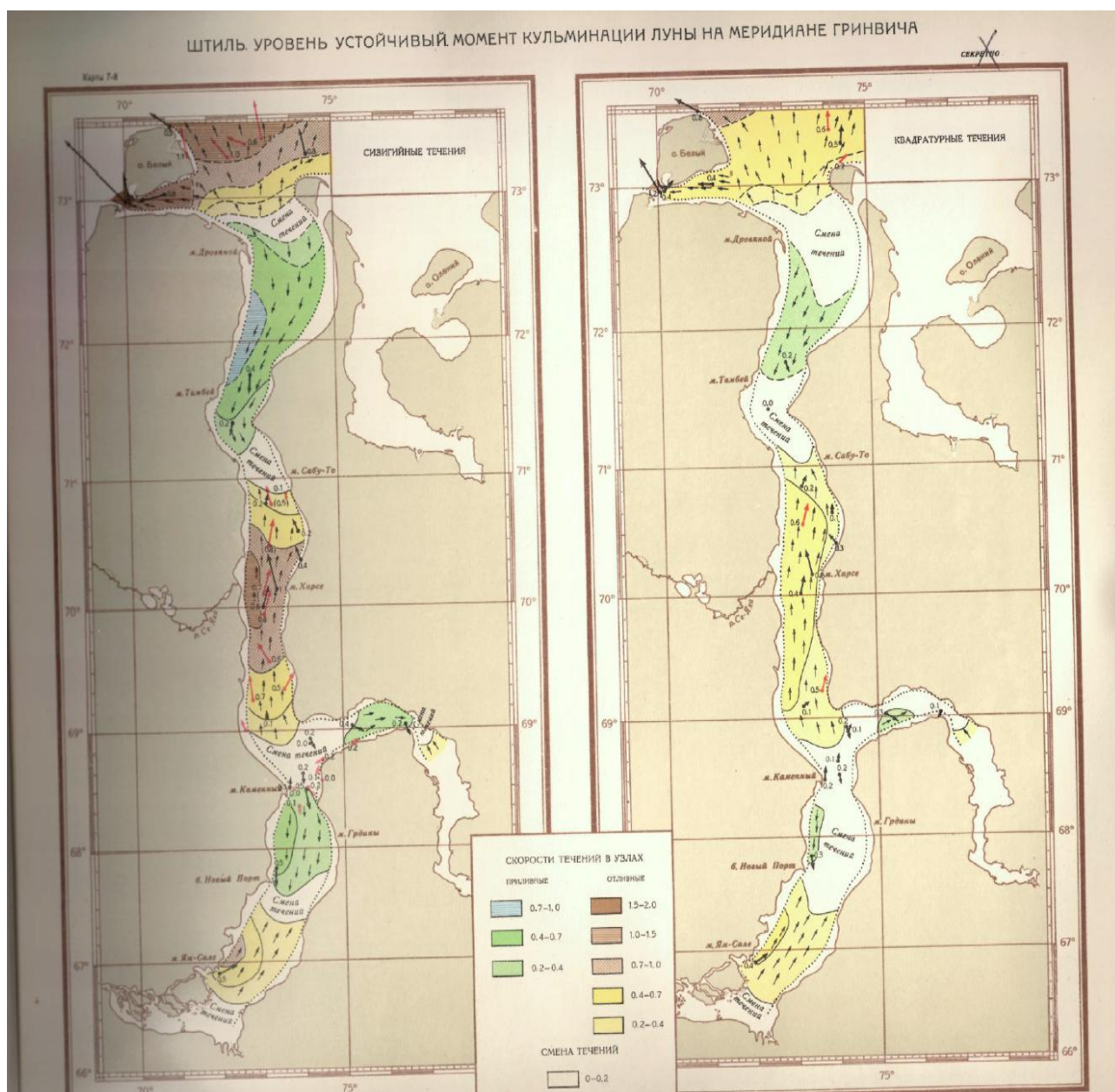


Рисунок 1 – Суммарные течения в поверхностном слое при штиле и устойчивом состоянии уровня на момент кульминации луны на меридиане Гринвича

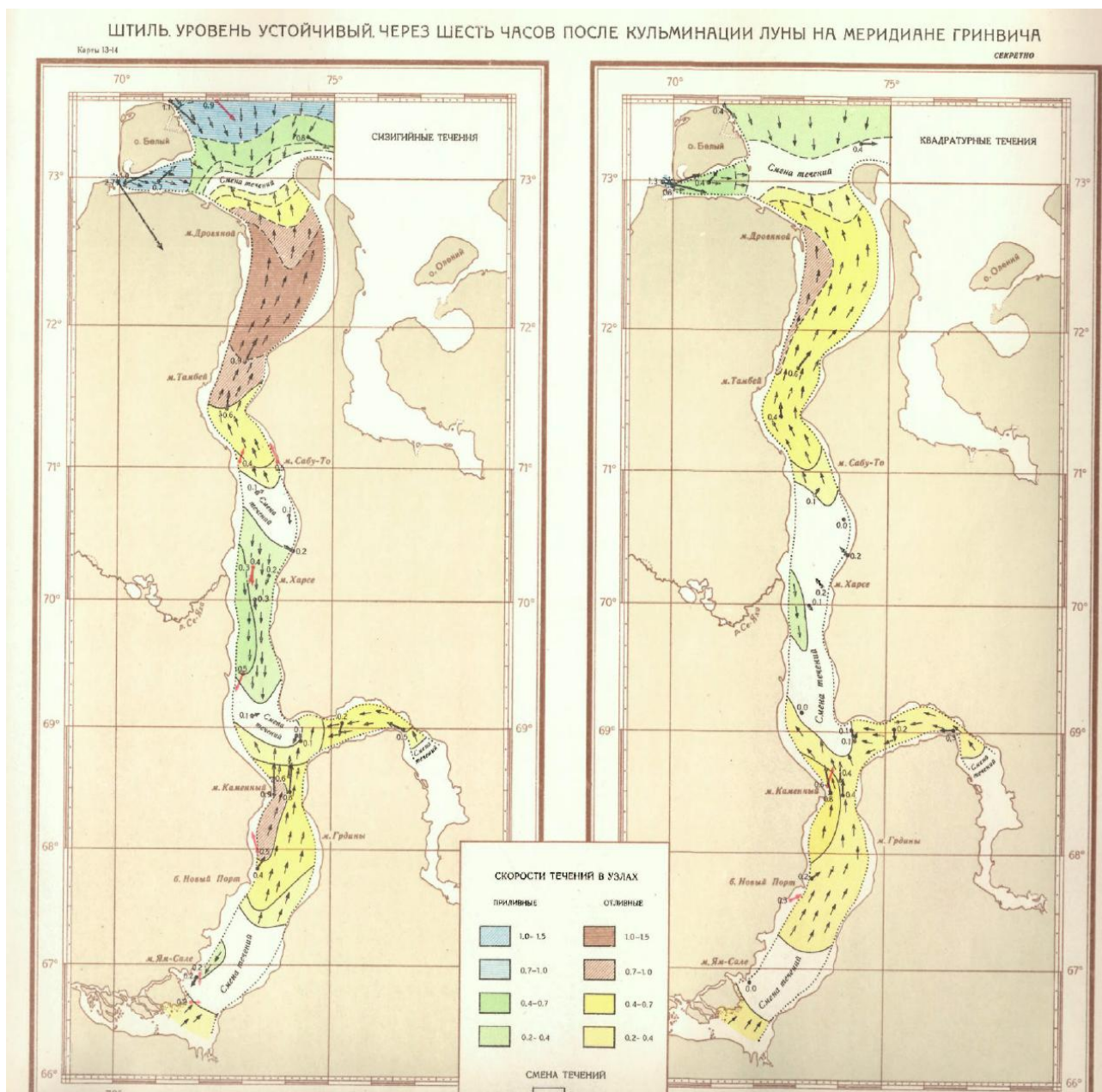


Рисунок 2 – Суммарные течения в поверхностном слое при штиле и устойчивом состоянии уровня через шесть часов после кульминации луны на меридиане Гринвича