Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему Математическое моделирование переноса примеси в мелководном заливе в программном комплексе CARDINAL на примере Онежского залива

Исполнитель Журавлева Аполлинария Анатольевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой _____
(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«10» мая 2026 г.

Санкт-Петербург

2026

Оглавление

Введение 3
1. Характеристика района исследования 5
1.1 Физико-географическое описание Онежского залива Белого моря 5
1.2 Хозяйственно-экономическое использование региона и планы развития 14
2. Постановка задачи с использованием программного комплекса CARDINAL 19
2.1 Основные уравнения и программная реализация программного комплекса CARDINAL 19
2.2 Расчетная область и краевые условия 21
3. Результаты численного моделирования динамики вод и переноса примеси в акватории Онежского залива в безледный период 2023 года 31
3.1 Результаты воспроизведения динамики вод залива с учетом приливно-отливных колебаний и речного стока 31
3.2 Результаты воспроизведения динамики вод с учетом приливно-отливных колебаний, речного стока и синоптической ситуации 37
3.3 Результаты воспроизводства переноса примеси в 2023 г. в осенний период 40
Заключение 55
Список использованной литературы 57
Приложение А Исходные данные о среднесуточном расходе р. Онега 63
Приложение Б Графики хода уровня моря 65

Введение

Белое море играет критически важную роль в экономическом и экологическом балансе Северо-Западного региона России. Однако из-за антропогенного воздействия, ввиду наличия здесь важных транспортных артерий и промышленных предприятий, в море поступают различные загрязняющие вещества от промышленных стоков, судоходства и коммунального хозяйства. Математическое моделирование переноса примеси, в том числе загрязняющих веществ, позволяет наглядно увидеть динамику распространения загрязнения в пространстве-времени. С его помощью появляется возможность представить различные сценарии распространения загрязняющих веществ и идентифицировать зоны наибольшего экологического риска, что особенно важно для мелководных заливов, которые характеризуются сложной береговой линией и донным рельефом, значительным влиянием речного стока, приливно-отливных волн и ветров. Для реализации этой задачи в представляемой работе был выбран Онежский залив Белого моря.

Цель исследования – реализация математической модели динамики вод Онежского залива с использованием программного комплекса CARDINAL для воспроизведения переноса примеси в мелководном заливе.

Задачи работы:

- проанализировать публикации о гидрологическом и гидрохимическом режиме Онежского залива Белого моря, хозяйственном использовании региона и на их основе дать физико-географическую и хозяйственно-экономическую характеристики района исследования;
- в программном комплексе CARDINAL реализовать численную модель динамики вод Онежского залива;

- провести численные эксперименты по воспроизведению динамики вод залива с использованием в качестве граничных условий данных о расходе реки Онега, ходе уровня и метеообстановке в 2023 году;
- выполнить численные эксперименты по расчету переноса нефтепродуктов (примеси) в различных условиях, характерных для осеннего периода;
- проанализировать полученные результаты численных экспериментов, оценить точность модели и выявить профиль ее применения для практических задач в будущем.

1. Характеристика района исследования

1.1 Физико-географическое описание Онежского залива Белого моря

Белое море – внутреннее море России, расположенное на севере ее европейской части (рисунок 1.1). Оно является полузамкнутым водоемом с высоким коэффициентом обособленности: Белое море связано с Баренцевым на севере через условную прямую линию длиной 170 км между двумя мысами – Канин Нос и Святой нос – и не имеет альтернативных связей с Мировым Океаном. Море полностью является шельфовым, поэтому глубины здесь небольшие – в среднем 67 метров.

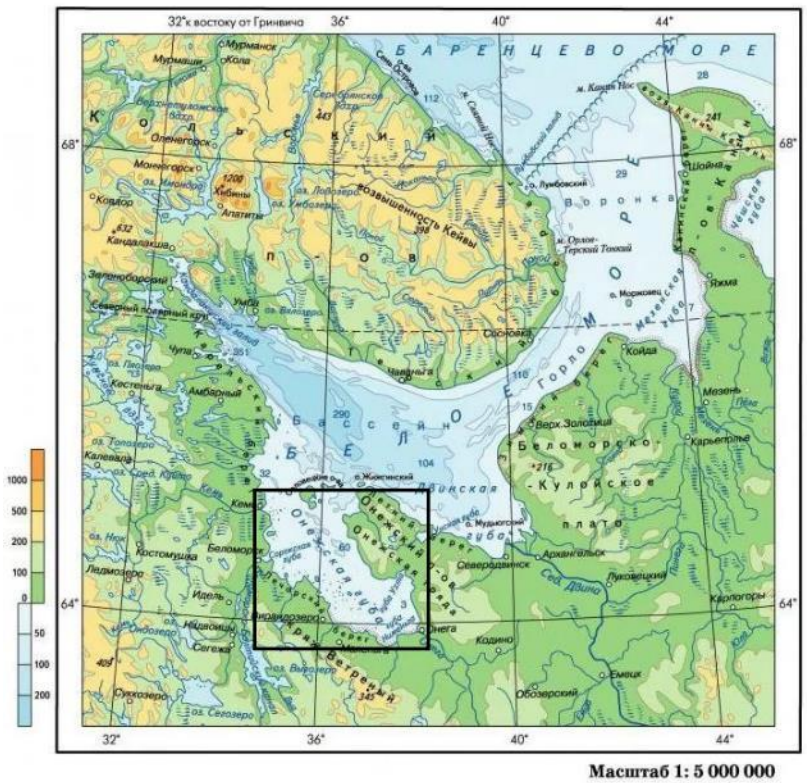


Рисунок 1.1 Онежский залив Белого моря (графическая основа физическая карта Белого моря [1])

В данной работе будет рассматриваться один из семи районов Белого моря – Онежский залив (Онежская губа). Это мелководная акватория, расположенная в юго-восточной части моря, вытянутая с юго-востока на северо-запад. Официальная граница залива проходит от реки Летней на Карельском берегу до мыса Горболукского на Летнем берегу (рисунок 1.1). Средняя глубина Онежского залива составляет всего 19 метров, и на большей части акватории она не превышает 50 метров за исключением двух участков: в проливе Восточная Соловецкая Салма, где отмечаются глубины свыше 80 метров, и западнее мыса Чесменского, где глубины могут достигать 62 метров. Большинство островов Белого моря расположено в Онежском и Кандалакшском заливах, среди которых самым крупным является остров Соловецкий из Соловецкого архипелага, находящийся на границе Онежской губы и Бассейна. Этот архипелаг разделяет вход в залив на две примерно равные части – Западная и Восточная Соловецкие Салмы. Данный участок акватории является наиболее глубоким и характеризуется неровным рельефом с резким увеличением глубин за короткий промежуток расстояния.

Береговая линия сильно изрезана – для Онежского залива характерны в основном абразионно-бухтовые и абразионно-аккумулятивные типы берегов (рисунок 1.2, [2]). Здесь одновременно происходит разрушение (абразия) выступающих частей и накопление (аккумуляция) наносов под волновым воздействием, разрушающим скалистый берег, а затем переносящим обломки в другие места. Большая часть прибрежного рельефа в Онежском заливе имеет шхерный характер, среди которой особенно выделяются: Кемские шхеры в проливе Западная Соловецкая Салма – система из более чем 30 островов, донные отложения которых представлены в основном валунами и галькой; архипелаг Боршовцов – Бережной, Голомянный и Длинный Боршовцы, а также несколько мелких островов. Сумская губа (Сумские шхеры) значительно вдается в берег, сильно изрезана и образует ряд мысов, значительно выступающих в море. Является относительно мелководной со средними глубинами в 2-4 метра, прибрежные участки сильно заболочены.

Из-за своего положения внутри залива ветровые волны здесь оказывают больше влияния в сравнении с приливно-отливными колебаниями [3].

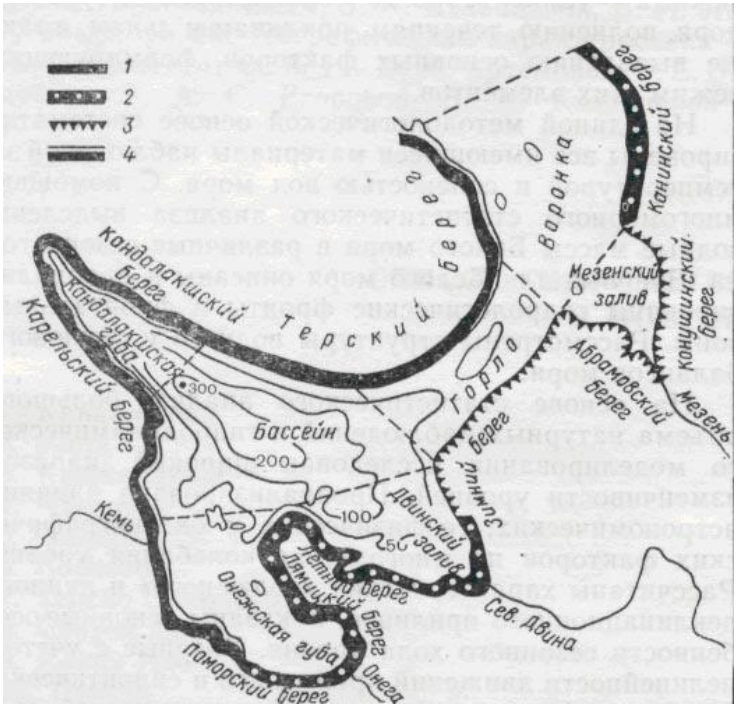


Рисунок 1.2 Типы берегов и рельеф дна Белого моря
по А. Д. Добровольскому: 1 – берега, сформированные субаэральными и тектоническими процессами, – складчатые, ровные; 2, 3, 4 – берега, формирующиеся преимущественно волновыми процессами; 2 – выровненные абразионно-аккумулятивные, 3 – выравнивающиеся абразионно-бухтовые, 4 – выравнивающиеся абразионно-аккумулятивные [2]

Для акватории Онежского залива, как и для всего Белого моря, характерны правильные полусуточные приливы. Они значительно меньше, чем в Мезенском и Кандалакшском заливах, так как поступательная приливная волна из Баренцева моря, распространяющаяся вдоль Горла и Бассейна и создающая стоячую волну, отражаясь от Летнего и Карельского берегов, имеет здесь меньшую силу. Высота приливов колеблется от 1 до 2,72 метров [4]. Приливное течение входит в Онежский залив из Бассейна и у Соловецких островов разделяется на восточную (через Восточную Соловецкую Салму),

среднюю (через Анзерскую Салму) и западную (через Западную Соловецкую Салму) струи. В шхеры приливное течение также входит с севера, а затем поворачивает на юг, принимая такое же направление, как и во внешхерной части залива. В узкостях между островами шхер течение делится на многочисленные струи, идущие в разных направлениях; при встрече двух или нескольких струй образуются сильные сулои и водовороты. Отливное течение имеет противоположное направление [5]. Средняя скорость приливного течения в Онежском заливе достигает 3-3,5 узлов – более 1 м/с [6, 7]. Именно благодаря своим высоким скоростям приливно-отливные течения оказывают большое влияние на гидрологический режим бассейна. Постоянные течения Онежского залива представлены на рисунке 1.3.

Высота волн в Онежском заливе сильно зависит от ветра и погоды, в открытой части залива они могут достигать 5-6 метров. По данным наблюдений высоты волн с 1977 по 2006 гг., представленных на сайте ЕСИМО [9] (рисунок 1.4), на станции Кемь-Порт высота волн в среднем составляет 0,22 метра и меняется незначительно от месяца к месяцу. В августе и октябре фиксируются волны, превышающие 1 метр. Повторяемость 99,4 % здесь имеют волны высотой до 0,5 метров; очень редко (с повторяемостью 0,5 %) возникает волнение 0,5-1,0 метров. На станции Разнаволок средняя высота волнения составляет около 0,25 метров в зимнее время и увеличивается до 0,35 метров в остальные сезоны. Волны, превышающие 1 метр, отмечаются с мая по декабрь. Повторяемость 90,9 % здесь имеют волны высотой до 0,5 метров; реже встречаются волны высотой 0,6-1,0 метров (с повторяемостью 7,3 %). Самые редкие волны здесь 2,1-2,5 метра — их повторяемость составляет 0,1 % и встречаются они как правило в осенние месяцы.



Рисунок 1.3 Постоянные течения Онежского залива [8]

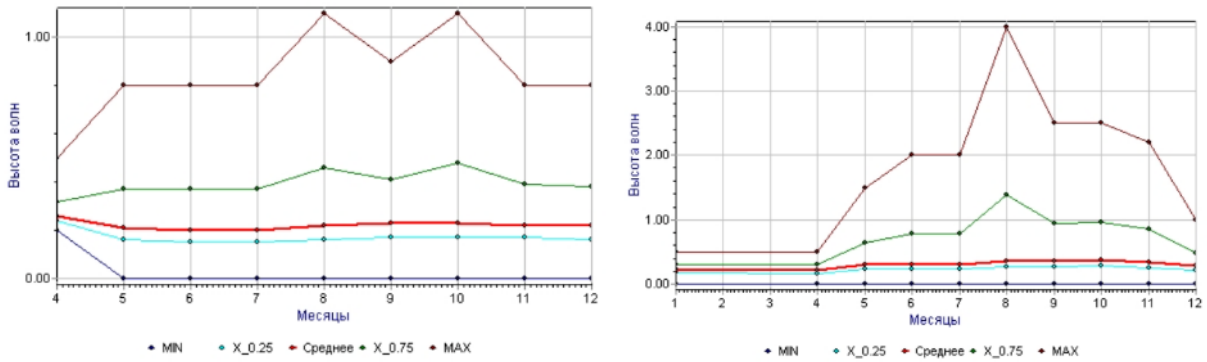


Рисунок 1.4 График высоты волн (в метрах) за период 1977-2006 гг. на станции Кемь-порт (слева) и Разнаволок (справа). Портал ЕСИМО [9]

Термохалинный режим. Особенности термического режима Онежского залива определяются географическим положением – это самая южная часть Белого моря с большим объемом речного стока и относительной мелководностью. Это способствует круглогодичному перемешиванию вод практически до самого дна. Кроме того, отдельным фактором считается интенсивное турбулентное перемешивание, которое образуется из-за высоких скоростей приливно-отливной волны в открытой части залива. Все эти

факторы приводят к аномально высоким температурам воды у дна по сравнению с остальными районами Белого моря [8]. Воды в Соловецких Салмах же, ввиду бóльших глубин, гораздо сильнее подвержены влиянию вод, поступающих из Бассейна. Зимой температура поверхностного слоя по всему Онежскому заливу одинакова и колеблется в промежутке от 0 до 1 °С, причем более низкие температуры наблюдаются в районе смешения местных вод с водами Бассейна. Летом – вплоть до 24 °С (ниже в районе Соловецких островов), осенью – от 0 до 10 °С с понижениями в центральной части бассейна [10, 11].

Средняя соленость Онежского залива составляет 25-26 ‰, несмотря на огромное влияние речного стока – это связано с особенностями рельефа около Соловецких островов, обеспечивающими поступление в залив большого объема вод из района Бассейна. Сезонные изменения: наименьшая соленость наблюдается в апреле и связана с периодом половодья, наибольшая – зимой, и связана с процессами ледообразования. Географическое распределение: уменьшается от центра залива к берегам до 20 ‰ и менее (в связи с активным речным стоком) и увеличивается с приближением к участку смешения с водами Бассейна на севере. График годового хода солености поверхностного слоя воды в центральной части Онежского залива представлен на рисунке 1.5.

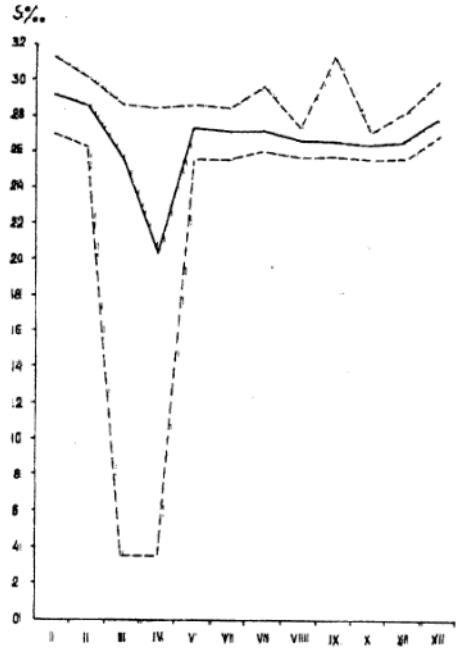


Рисунок 1.5 Годовой ход солености поверхностного слоя воды в центральной части Онежского залива [8]

Г и д р о л о г и ч е с к и й р е ж и м . Главным источником пресных вод, поступающих в залив, служит река Онега, ежегодно поставляющая 16,7 км³ воды, что составляет примерно 7,4 % от всего речного стока. Средний многолетний расход воды р. Онега в створе у села Порог, находящегося в 31 км выше устья, составляет 507 м^3/с. В ходе среднегодовых расходов воды в Справочно-аналитическом обзоре гидрологического режима устьевой области реки Онега [7] выявлена тенденция к увеличению стока – коэффициент линейного тренда составляет 1 м^3/с в год. На период с апреля по июнь приходится более половины объема годового стока (53 %), из которых 32 % приходятся на майский сток. Доля зимнего стока (с декабря по март) составляет 13 %.

Второстепенными, но не менее важными в процессах речного стока, являются реки Кемь (8,73 км³) и Нижний Выг (8,42 км³). Реки Мягрека, Шуя, Сума, Колежма, Нюхча и Малошуйка суммарно поставляют в Онежский залив 2,2 км³ пресных вод [12]. По данным работы Булавиной А. С. [13] из-за

морфометрии бассейна и малого речного стока Онежский залив считается одним из наиболее застойных в Белом море. Воды здесь обновляются в среднем за 1,5 года. Средняя мутность вод в устье реки Онега составляет 9,1 г/м^3, наибольшие значения характерны для половодья, где максимум мутности наступает в первую декаду мая. Среднегодовой расход взвешенных наносов составляет 10 кг/с, колеблясь в разные месяцы от 0,1 до 67,4 кг/с [7].

К л и м а т и ч е с к и й р е ж и м . Климат в Белом море субарктический, с чертами как морского, так и континентального в зависимости от района. Ветровой режим в Онежском заливе в зимний период, как и на всем Белом море, формируется под действием Исландского минимума: в основном наблюдается циклонический тип циркуляции (77 %), реже – области повышенного давления (23 %). В основном отмечаются юго-восточные и южные ветра. Весной и летом преобладают северные ветра. От января к апрелю их повторяемость увеличивается практически вдвое. В районе Соловецких островов наиболее сильное волнение наблюдается при ветрах северо-западного, северо-восточного и северного направления [14].

Территория Белого моря полностью расположена в зоне избыточного увлажнения. В работе Назаровой Л. Е. [15] показано, что наибольшее количество осадков в районе Онежского залива выпадает с июня по октябрь – до 60 % годовой суммы. Минимальное отмечается в марте–апреле. В целом для района не характерно выпадение большого количества осадков за короткий период времени. Число дней в году, когда количество осадков, выпавших за день, составило более 10 мм, не превышает 14 мм для г. Онеги и 10 мм для г. Кемь-Порт.

Л е д о в ы й р е ж и м . В зимнее время года устойчивое замерзание акватории Онежского залива происходит в 88 % случаев. Постоянный ледяной покров преимущественно образуется к середине декабря. Наибольший прирост мощности льдов происходит в феврале [16]. Наибольшая сплоченность льда в заливе, осредненная за период 1978-2021 гг., также наблюдается в феврале и составляет 0,78. Разрушение ледяного покрова

начинается в апреле. В районе Соловецких островов ледообразование несет особенный характер и начинается уже в конце сентября, а полное очищение ото льда происходит в середине июня. Средняя продолжительность периода с ледовыми явлениями в районе Соловецких островов составляет 166 дней [17]. Характерно образование небольших полыней вокруг архипелага (рисунок 1.6).

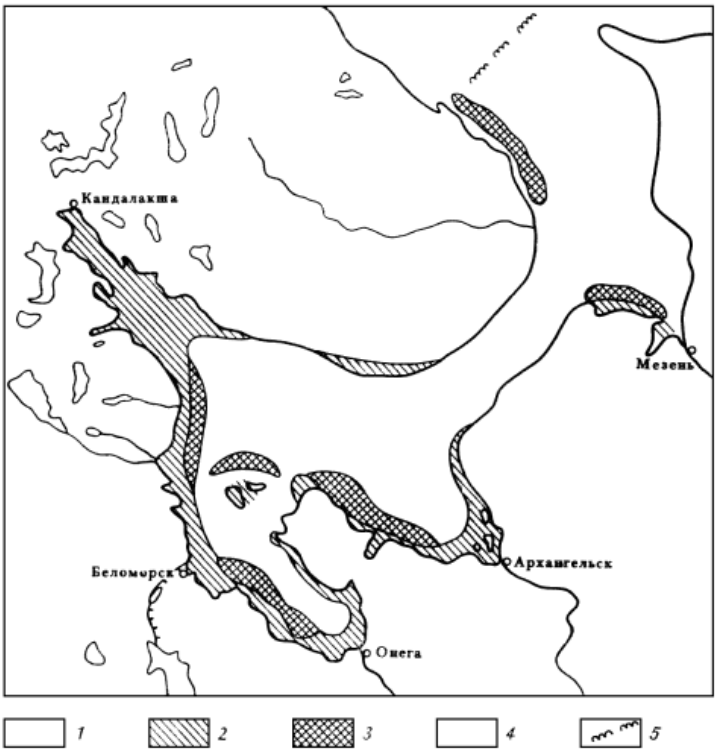


Рисунок 1.6 Ледяной покров в Белом море зимой: 1 – дрейфующие льды; 2 – припай; 3 – полынья; 4 – чистая вода; 5 – граница плавучих льдов [2]

Гидрохимический режим и загрязненность вод. Максимум содержания растворенного кислорода наблюдается в весенний период, что связано с весенним цветением фитопланктона. В летний период в Онежском заливе кислородосодержание составляет в среднем 97–98 % насыщения. В шхерных районах залива ближе к осени наблюдается выравнивание кислородосодержания по всей толще воды. В летний период

выделяется стратификация вод по фосфатам, где разница в показателях в поверхностном и придонном слоях может быть значительной [3].

Речная система бассейна Белого моря относится к Северному экономическому району с высокой плотностью промышленных объектов. Для Онежского залива наиболее важен Сегежский целлюлозно-бумажный комбинат, расположенный в г. Сегежа Республики Карелия. Ежегодно он сбрасывает 37,2 млн $м^3$ загрязненных сточных вод, часть из которых успевает добраться до Белого моря [18]. Негативное влияние на химический состав воды р. Онега оказывают сточные воды промышленных предприятий в городе Каргополь, а также загрязненные притоки – р. Волошка, р. Кодина и др. [19] В шести районных центрах Республики Карелия отсутствуют канализационные очистные сооружения, и неочищенные сточные воды сбрасываются в водоемы, являющиеся источниками водоснабжения населения — в городе Кемь (сброс в Белое море) и Беломорск (сброс в р. Нижний Выг) [18].

По данным на 2024 г. средняя концентрация органических веществ, поступающих вместе со стоком реки Онега, составила 28,2–30,6 мг/л, что отмечается как снижение по сравнению с данными за предыдущий год. Среднегодовые концентрации марганца опустились до нормативного, цинка и аммонийного азота – ниже нормативных значений, нефтепродукты превысили предельно допустимую концентрацию в два раза. В связи с этим устью реки Онега был присвоен 3-й класс качества – «очень загрязненная» [19]. Содержание селена в Онежском заливе варьируется от 0,46 до 0,68 мкг/л [20].

1.2 Хозяйственно-экономическое использование региона и планы развития

Онежский залив является активной хозяйственной зоной. Основная деятельность сконцентрирована в области рыболовного промысла и лесозаготавливающей промышленности. Основной функцией региона

является логистическая – здесь проходит Беломорско-Балтийский канал (ББК), соединяющий Белое море с Онежским озером. В 2003 году в рамках проекта «Белое море» началась организация перевозки нефтеналивных грузов через Беломоро-Балтийский канал с дальнейшей перевалкой на рейде в танкер-накопитель [21, 22]. Беломорско-Балтийский водный путь используется не только для перевозки грузов, но и является перспективным туристическим направлением – за 2025 год в пассажирских перевозках было задействовано 54 судна и перевезено 3,267 тыс. человек [23].

Также можно выделить морской порт Онега, расположенный на правом берегу реки Онега и включающий в себя также три морских терминала – Кемь, Беломорск и Соловки. Морской терминал Беломорск, находясь на выходе из Беломорско-Балтийского канала, выполняет роль важнейшего транспортного узла. Здесь осуществляется перевалка грузов лесодеревообрабатывающих предприятий и бункеровка транспортных судов, перевозка пассажиров морским и речным транспортом. По данным на 2022 г. «… порт Онега занимает восьмую позицию по грузообороту среди портов Арктического морского пути (АМП) Западной Арктики с удельным весом 0,1 % от общего объема грузооборота портов АМП. Средний объем перевалки грузов за 2019-2022 гг. составил около 130 тысяч тонн, транзитный груз – 210 тысяч тонн» [24]. Объем перевалки лесных грузов в морском порту Онега в 2025 году составил 38,9 тысяч тонн, а итоговый общий грузооборот, включая морские терминалы Соловки и Беломорск, составил 212,546 тысяч тонн [25]. По сравнению с другими районами Белого моря Онежский залив не богат на крупные порты и большой пассажиропоток, однако он всё ещё является важной частью водного транспортного сообщения региона.

Самым большим объектом промышленности на Онежском заливе является уже упомянутый Сегежский целлюлозно-бумажный комбинат, работающий с 1939 года и в основном производящий лесохимическую продукцию (такие как канифоль, жирные кислоты таллового масла, скипидар-сырец), картон, мешочную продукцию и крафт-бумагу.

Основными промысловыми видами рыб Белого моря являются навага северная и беломорская треска. Ранее к ним относилась беломорская сельдь, особенно почитаемая в районе Соловецких островов, где она традиционно считалась местным деликатесом, но в последние годы из-за потепления климата в регионе изменилась температура воды в местах большого скопления сельди и активного промысла, из-за чего рыба стала уходить в труднодоступные районы и изменила миграционный цикл. В связи с этим добывать беломорскую сельдь в крупных масштабах стало экономически невыгодно [26]. На рисунке 1.7 представлен график динамики запасов и вылова беломорской сельди в 1998-2020 гг. [27] У Поморского берега от Кеми до Онеги расположены нерестилища онежской сельди, а наиболее обширные отмечаются на прибрежном мелководье, а в устье реки Онега на нерест заходит атлантический лосось [7].

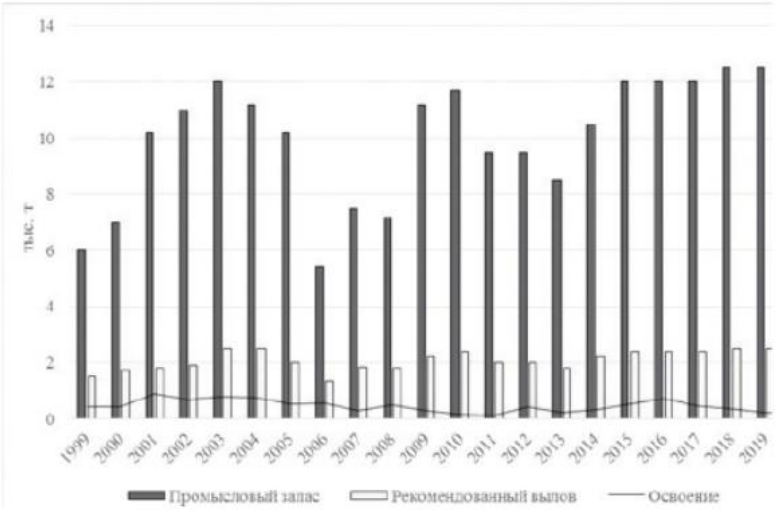


Рисунок 1.7 Динамика запасов и вылова беломорской сельди в 1998-2020 гг., в тоннах [27]

Навага обитает вблизи берегов на небольших глубинах, часто встречается в сильно опресненных районах, особенно в преднерестовый период, когда она массами подходит к берегам и даже входит в устья рек.

Хозяйственное значение имеет в Двинском, Онежском и Мезенском заливах (рисунок 1.8), причем в Онежском заливе северная навага обитает на всей акватории и имеет множество естественных районов нереста. Второстепенными с точки зрения промысла являются такие рыбы, как корюшка, полярная, речная и морская камбалы, мойва, треска и зубатка, повсеместно встречающиеся в Онежском заливе. У Соловецких островов наблюдаются места наибольшей концентрации икры и личинок трески [28].

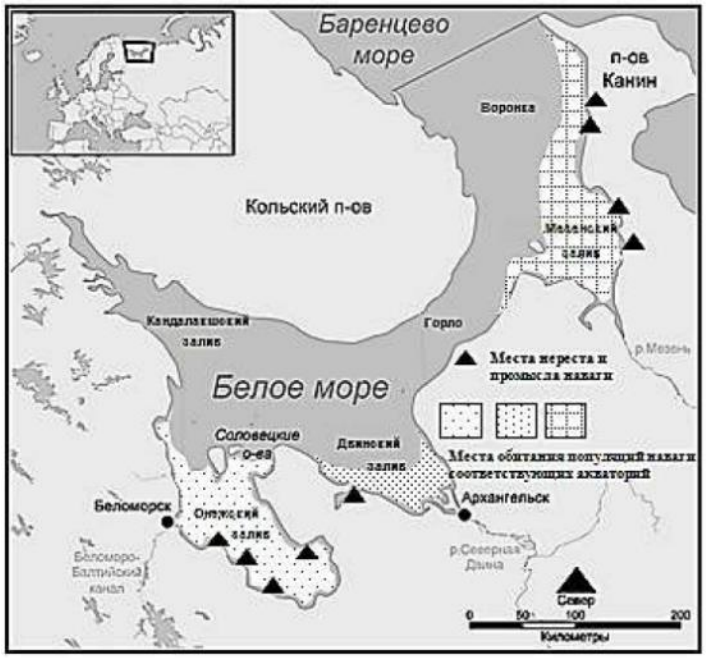


Рисунок 1.8 Карта-схема района обитания наваги Белого моря [29]

Марикультура в Белом море — перспективное направление, позволяющее восстановить и увеличить промысловый потенциал региона. Всего по оценкам ПИНРО на 2000 год, пригодные для развития хозяйств марикультуры акватории достигают порядка 1,3 тыс. гектаров. В Онежском заливе потенциальными районами для ведения марикультуры считаются: реки Онега, Кемь, Поньгома, Беломорск; Соловецкие острова, Кемские и Сумские шхеры. Именно шхерные районы позволяют выращивать без отрицательных последствий для окружающей среды около 18,6 тыс. тонн рыбы; 7,7 тыс. тонн

мидий; 6,9 тонн морских водорослей. Потенциальные возможности производства посадочного материала для лососевых товарных ферм в прибрежье Белого моря составляют 1,9 тыс. тонн [30].

В условиях возрастающей антропогенной нагрузки для принятия управленческих решений, оценки рисков негативного воздействия на экологически значимые зоны и решения других прикладных задач необходимо иметь модель, воспроизводящую динамику залива и позволяющую оценить перенос примеси, поступающей в акваторию.

2. Постановка задачи с использованием программного комплекса CARDINAL

2.1 Основные уравнения и программная реализация программного комплекса CARDINAL

Для построения численной модели в данной работе использован программный комплекс (ПК) CARDINAL, позволяющий создавать математические модели водных объектов. ПК CARDINAL уже был успешно применен на практике более чем в двухстах проектах различными организациями, в том числе для моделирования распространения нефтепродуктов в Онежском заливе по заказу проектных организаций [31].

В программном комплексе CARDINAL решаются в приближении гидростатики с помощью метода конечных разностей уравнения для скорости течения (*u,v,w*) (1-3), уровня воды (ζ) (4), температуры T (°K) (5), солености воды (S) (6) и концентраций примесей (*c*) (7).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \omega_s \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} = \varpi_s \qquad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\, g\frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_o}\int_z^{\zeta}\frac{\partial \rho}{\partial x}dz - \frac{1}{\rho_o}\frac{\partial P_a}{\partial x} + f_c v +$$

$$+ K\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v_T\frac{\partial u}{\partial z}\right) \qquad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -\, g\frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_o}\int_z^{\zeta}\frac{\partial \rho}{\partial y}dz - \frac{1}{\rho_o}\frac{\partial P_a}{\partial y} + f_c u +$$

$$+ K\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v_T\frac{\partial v}{\partial z}\right) \qquad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z} = \omega_s T_s + K_c\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_c \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{(1-\alpha_w)}{\rho_0 c_p}\frac{\partial SW}{\partial z} \qquad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u\frac{\partial S}{\partial x} + v\frac{\partial S}{\partial y} + w\frac{\partial S}{\partial z} = \omega_s S_s + K_c\left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_c \frac{\partial s}{\partial z}\right) \qquad (6)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u\frac{\partial c}{\partial x} + v\frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_0)\frac{\partial c}{\partial z} = \omega_s c_s - \lambda c + K_c\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}\right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(v_c \frac{\partial c}{\partial z}\right) \qquad (7)$$

где U и V – удельные расходы; ω_s – расход сбросной воды из источников на единицу объема; ϖ_s – расход сбросной воды из источников на единицу площади поверхности; g – ускорение свободного падения; ρ(T, S) – плотность воды, определяемая по ее температуре T и солености S по зависимости UNESCO4 [32].

Координата z направлена вертикально вверх.

Уравнение (1) характеризует изменение объема воды в ячейке за счет внутренних источников; уравнение (2) характеризует изменение уровня свободной поверхности от потоков воды; уравнения (3-4) – система уравнений движения, получаемая при разложении уравнений Эйлера; уравнения (5-6) – изменение температуры и солености воды во времени; уравнение (7) характеризует изменение концентрации примеси.

Представленные уравнения преобразовывались к криволинейным неортогональным координатам и к контравариантным составляющим скорости и решались полунеявным методом конечных разностей на криволинейной гранично-зависимой С-сетке Аракавы. Узлы для расчета уровня находятся внутри сетки, граница области проходит по граням, на которых заданы составляющие удельных расходов. Расчеты выполняются как в двумерной (плановой), так и в трехмерной постановках. В программе

используется переход к криволинейным гранично-зависимым координатам [32].

2.2 Расчетная область и краевые условия

Для того чтобы успешно построить математическую модель и выполнить прогноз требующейся характеристики, необходимо правильно определить краевые условия. Это включает в себя непосредственно создание граничной области и батиметрической карты области построения, а также установка хода значений расхода воды, уровней моря или свободного протекания на жидкой границе. Чтобы наиболее точно построить модель Онежского залива в программном комплексе CARDINAL в качестве подложки была выбрана карта глубин Онежского залива в лоции 1988 года выпуска, масштаб 1:200 000 [33].

Первым этапом создания расчетной области модели Онежского залива является ввод границ внешнего контура. Далее следует определение активных контуров – тех, которые будут использоваться при генерации расчетной сетки. Когда главный (внешний) контур оказывается замкнут (между точками нет свободных участков или отрезков, не связанных друг с другом), выбираются контрольные точки, которым далее присваиваются номера узлов сетки. В данном случае по оси абсцисс *i* была выбрана 71 точка, по оси ординат *j* – 153 точки (рисунок 2.1). Эти номера будут определять размер сетки. Положительные направления *i* и *j* образуют правую двойку векторов.

После того, как четыре контрольные точки были успешно введены, запускается генерация расчетной криволинейной сетки. Если в процессе генерации заметны явные недочеты (например, пересекаются линии сетки или отдельные ячейки имеют форму, приближенную к треугольнику или удлиненному ромбу), тогда в этой области дополнительно должны быть добавлены четыре угловые точки, как бы «отрезающие» некачественную область от основной криволинейной сетки. С помощью этого действия внутри

области для более качественного представления модели добавляется необходимое количество узлов сетки. На рисунке 2.1 видно, что данный метод был применен для двух участков: Сумские шхеры и Соловецкие острова.

Когда считается, что качество главного контура криволинейной сетки приемлемо, следует нанести на неё крупные острова, не «проваливающиеся» под криволинейную сетку – те, которые занимают по горизонтали либо по вертикали больше двух узлов сетки. Всего оказалось 15 островов, подпадающих под этот критерий и занесенных в результате на расчетную криволинейную сетку, что отражено на рисунке 2.1.

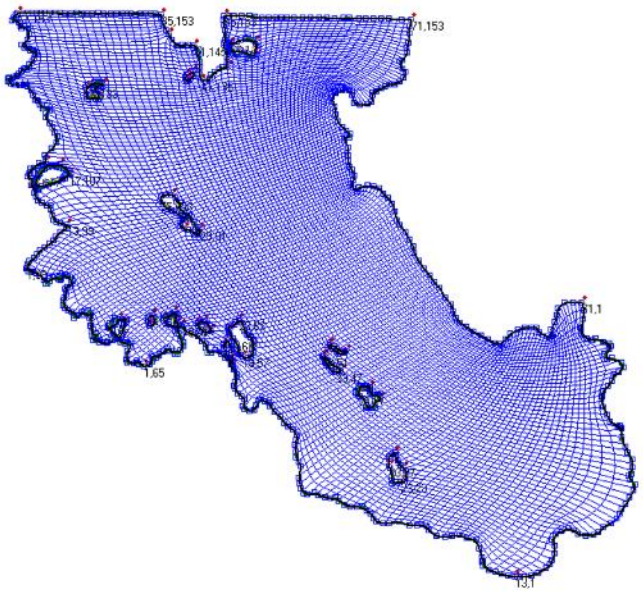


Рисунок 2.1 Расчетная криволинейная сетка модели Онежского залива с нанесенными контрольными точками (без карты-подложки)

Второй этап – формирование карты глубин в модели Онежского залива с использованием режима свободных точек. В этом режиме вводятся произвольно расположенные точки со значениями глубин, после чего глубины в этих точках интерполируются на расчетную криволинейную сетку. Границы области считаются вертикальными стенками с конечными значениями глубин на них.

Данная методика была выбрана ввиду наличия подходящей карты-подложки, на которую нанесены не только сами изолинии глубин, но и промежуточные значения внутри них. Благодаря этому интерполяция на криволинейную сетку происходит более точно и графическое представление карты глубин в готовой модели может быть выполнено с таким шагом изолиний, который будет наиболее подходящим в зависимости от ситуации. На рисунке 2.2 представлен конечный результат модели карты глубин, выполненной в ПК CARDINAL, для Онежского залива с шагом изобат в 4 метра.

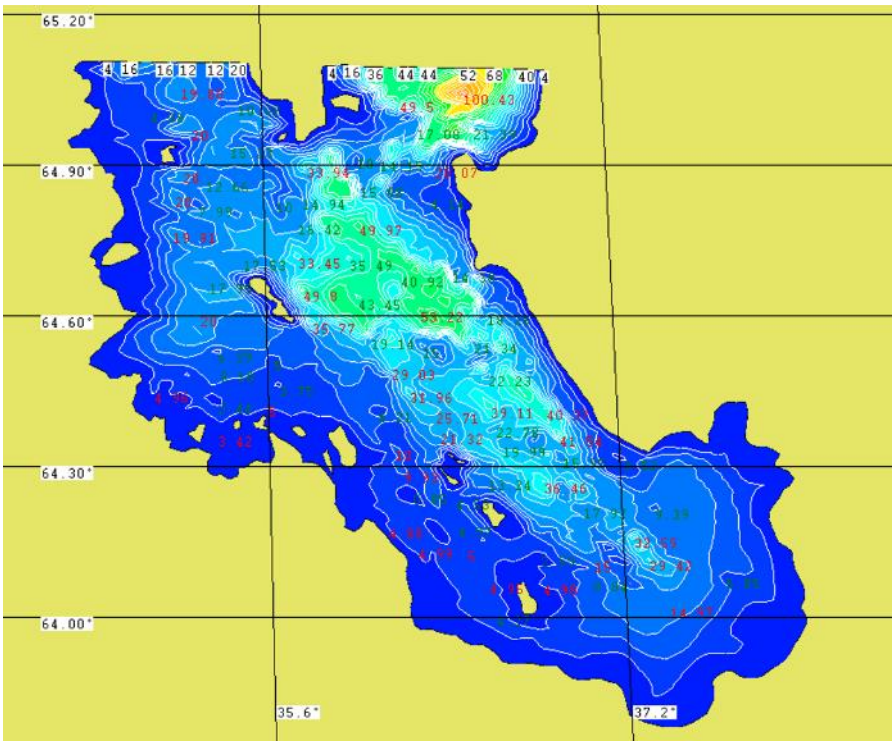


Рисунок 2.2 Изолинии глубин в Онежском заливе в ПК CARDINAL

Рельеф преобразованной в ПК CARDINAL карты глубин Онежского залива совпадает с рельефом на карте-подложке, хорошо отражая области больших и малых глубин.

Рекомендуемый шаг по времени для расчетов составляет 49,63 с. Причина этого ограничения заключается в образовании длинных волн в ячейке

с координатами {62, 144}. По результатам внутрипрограммных статистических оценок средний шаг сетки между «уровенными» точками составляет 2446,7 метров.

Для полной реализации модели Онежского залива также необходимо задать краевые условия, включающие в себя граничные (вода-вода, вода-суша) и начальные условия.

Граничные условия. Основным граничным условием типа вода-суша являются границы внешнего контура – так называемые вертикальные стенки. На участках твердой границы нормальная к границе компонента скорости равна нулю (u_n=0), а тангенциальная может быть задана нулевой или определяется по некоторому закону, например:

$$K\frac{\partial u_\tau}{\partial n} = f_b u_\tau \left|\underline{V}\right|, \qquad (8)$$

где f_b – безразмерный коэффициент бокового трения, K – коэффициент горизонтальной турбулентности.

Для задания граничных условий на жидких границах были выбраны два варианта: 1) границы с данными о расходах в устье реки Онега; 2) границы с данными об уровнях в районе Соловецких островов.

Данные о среднесуточном расходе реки Онега за 2023 г. были взяты из архива АИС ГМВО (Автоматизированная Информационная Система Государственного Мониторинга Водных Объектов) раздела «Ф.15. Расход воды рек, ручьев, каналов, м^3/с. Двинско-Печорский бассейновый округ» для поста р. Онега – с. Порог (№ 70842) [34]. Выбор пал на этот гидрологический пост по той причине, что из всех постов, расположенных в бассейне реки Онега, он наиболее близок к месту ее впадения в Белое море. Ряд наблюдений, представленных для этого поста, включает в себя исключительно безледный период (с 1 мая по 15 ноября 2023 г.), поэтому было принято решение восстановить ряд, используя как ряд-аналог данные поста, находящегося выше по течению (р. Онега – с. Турчасово, № 70011), – этот метод уже ранее

использовался в Справочно-аналитическом обзоре гидрологического режима устьевой области реки Онега [7] ровно с этим же гидрологическим постом, но на больший временной промежуток. Полные таблицы исходных данных для обоих гидрологических постов представлены в Приложении А. Коэффициент корреляции между рядами данных совместного периода наблюдений (R≈0.99), а также успешная проверка на качество по критериям Стьюдента (для средних значений) и Фишера (для дисперсии) позволили благополучно восстановить ряд данных на периоды с 1 января по 30 апреля и с 16 ноября по 31 декабря с помощью статистического метода множественной линейной регрессии. На рисунке 2.5 представлен графический результат восстановления исходного ряда данных расходов гидрологического поста с. Порог.

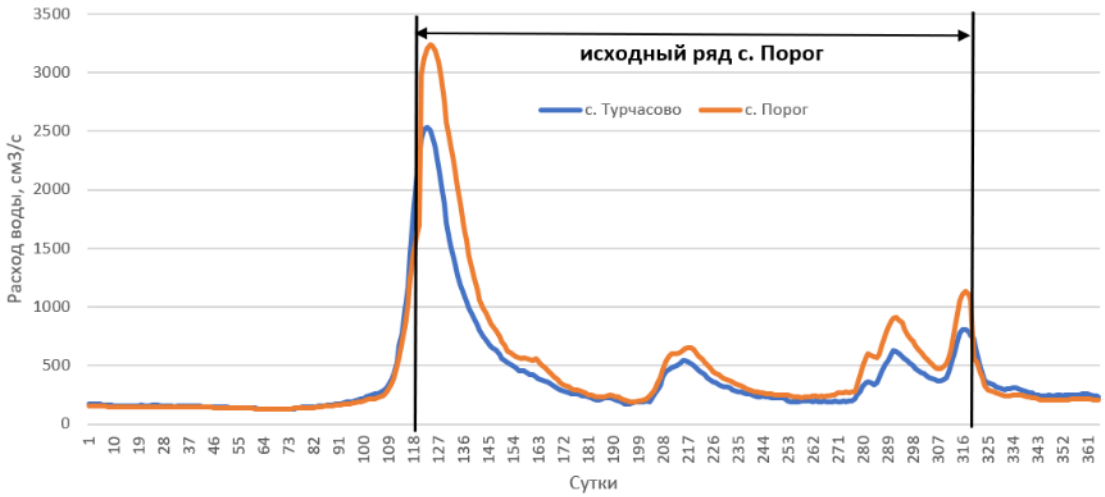


Рисунок 2.3 Совмещенный график исходного восстановленного ряда и ряда-аналога для расходов р. Онега в 2023 г.

Уравнение множественной линейной регрессии [35] для исходного ряда имеет вид:

$$Н(П)_i = 0{,}711*Н(Т)_i+28{,}2, \quad (9)$$

где $Н(П)_i$ – *i*-тый уровень на станции река Онега – с. Порог;

$H(T)_i$ – *i*-тый уровень на станции река Онега – с. Турчасово.

Данные о ежечасном изменении уровня воды за 2023 г. были взяты из портала ЕСИМО (Единая государственная Система Информации об обстановке в Мировом Океане), раздел «Предвычисление приливов», район Белое море [36]. Наиболее географически близкими к границам криволинейной сетки точками, для которых на портале были представлены данные о ходе уровня, являются станции около г. Кемь, на о. Соловецком и о. Жижгинском. Данные с этих станций в итоге были выбраны для задания границ хода уровня. На рисунке 2.4 отражен совмещенный график хода уровня в Кеми, Соловецком и Жижгинском островах.

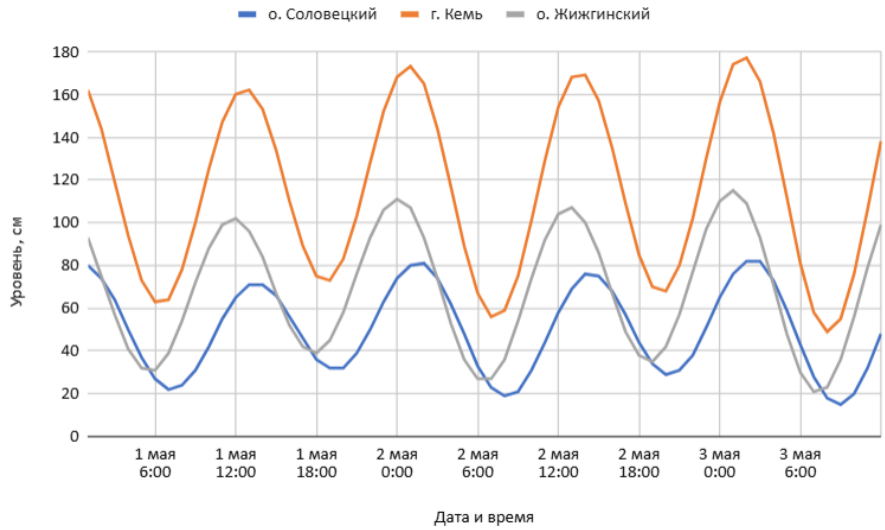


Рисунок 2.4 Совмещенный график хода уровня в трех станциях, используемых для задания граничных условий в период с 1 по 3 мая 2023 г.

На рисунке 2.5 представлена карта расположения открытых границ модели Онежского залива в ПК CARDINAL, где D1-D2 – это среднесуточные данные о расходах (рисунок 2.5б), L1-L2 – ежечасные данные о ходе уровня (рисунок 2.5а). Данные о ходе уровня в проливе Западная Соловецкая Салма задавались следующим образом: L1 – г. Кемь, L2 – о. Соловецкий; в проливе Восточная Соловецкая Салма: L1 – о. Соловецкий, L2 – о. Жижгинский.

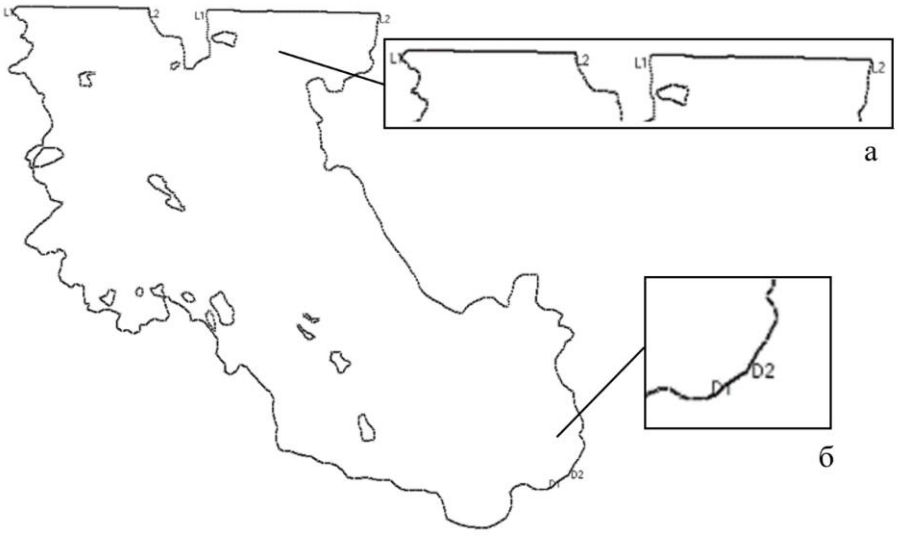


Рисунок 2.5 Открытые граничные условия для модели Онежского залива: а – граничные условия – ход уровня, б – граничные условия – расход

Все дальнейшие расчеты выполняются при задании трехслойной структуры залива. Это связано с тем, что гидрологический режим мелководных заливов, в том числе интенсивность поступления воды из внешних источников, тесно связан со сгонно-нагонными ветрами, приливными колебаниями и характером материкового стока крупных рек. Также в летний период на больших глубинах в северной части залива, в проливах Западная и Восточная Соловецкая Салмы, устанавливается четкая двухслойная стратификация [37]. Это необходимо учитывать в моделировании переноса примеси.

Также дополнительно привлечены данные об изменении скорости (м/с) и направлении (°) ветра через панель «Атмосфера». Метеообстановка получена из архива «Расписание погоды» [38] для метеорологических станций г. Кемь, г. Онега и о. Соловецкий с 1 января по 31 декабря 2023 г. и носит дискретность 3 часа. Эти данные в дальнейших экспериментах будут нужны для того, чтобы более точно передать динамику поверхностных вод Онежского залива, так как в подобных мелководных заливах характеристики

движения ветра носят определяющий характер в переносе поверхностных водных масс.

Начальные условия. Перед тем, как непосредственно проводить расчеты переноса примеси, модель необходимо «раскачать» – привести гидродинамический режим бассейна к стационарному, либо квазистационарному состоянию. На текущем этапе исследования численные эксперименты проводились только в безледный периода.

Для раскачивания динамики вод использовался период с 1 января по 30 апреля 2023 г. В период «раскачки» информация об уровне и расходах представляли собой закольцованные данные самого полноводного месяца – мая. Зацикливание данных об уровне выполнено таким образом, чтобы фазы приливно-отливных колебаний совпадали друг с другом и не нарушали естественный ход (пик полной воды не должен соседствовать с периодом малой воды и наоборот, а также необходимо обеспечить достоверный по времени период полусуточных колебаний уровня). На рисунке 2.6 представлен переход на границе цикла для станции Соловецкий остров.

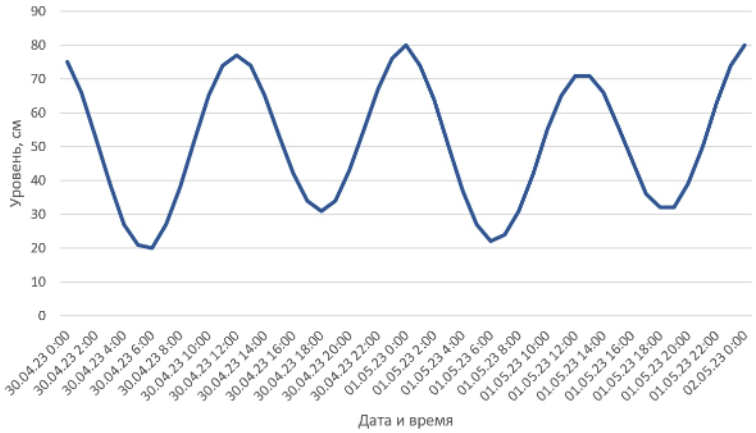


Рисунок 2.6 Заданный ход уровня на станции о. Соловецкий с 30 апреля по 2 мая 2023 г. по данным [36]

Зацикливание информации о метеообстановке происходило немного по-другому. Для каждого из первых трех месяцев (январь, февраль и март) была

определена повторяемость – частота, с которой встречались те или иные направления ветра за определенный интервал времени. В нашем случае – за месяц. На основе данных о повторяемости направлений ветра были построены розы ветров (диаграммы, показывающие распределение в определенной местности частоты и силы дующих ветров в зависимости от их направления) для трех месяцев на каждой отдельно взятой станции и определены наиболее часто возникающие направления ветра (рисунки 2.7-2.9).



Рисунок 2.7 Розы ветров с января по март 2023 г. для станции г. Кемь по данным [38]



Рисунок 2.8 Розы ветров с января по март 2023 г. для станции г. Онега по данным [38]



Рисунок 2.9 Розы ветров с января по март 2023 г. для о. Соловецкого по данным [38]

Наиболее повторяющиеся направления ветра затем были внесены в ряд данных соответствующего месяца, заменив собой первоначальную информацию. Например, исходя из рисунка 2.7, в марте в Кеми наиболее часто наблюдался западный ветер. Значит для каждого случая следует внести информацию об азимуте 270 ° в участок исходного ряда за соответствующий месяц. Если в каком-то из месяцев есть два приблизительно равнозначных по повторяемости направления ветра, то они оба вносятся в исходный ряд так, чтобы по продолжительности каждое наблюдалось ровно половину месяца (обязательно учитывая, в какой половине месяца одно из этих двух направлений проявляется чаще, чем другое).

Данные о направлении ветра в апреле представляют собой копию данных о направлении ветра в мае 2023 г. Информация о скорости ветра при этом остается неизменной для каждого из последующих месяцев и является исходными данными, полученными из архива «Расписание погоды» [38].

При проведении численных экспериментов по оценке переноса примеси задавались данные об объемах поступившего загрязнителя и его характеристиках. Более подробно условия экспериментов описаны в пункте 3.3.

3. Результаты численного моделирования динамики вод и переноса примеси в акватории Онежского залива в безледный период 2023 года

3.1 Результаты воспроизведения динамики вод залива с учетом приливно-отливных колебаний и речного стока

Из-за того, что начальные условия счета в отсутствии «раскачки» дают нулевые значения полей динамики – уровня воды, x и y-компонент скорости – возникает необходимость получения этих значений в результате экспериментов по обеспечению наиболее точной реализации динамики поверхностных вод бассейна. В этом разделе описаны эксперименты, проводимые исключительно с учетом влияния приливно-отливных колебаний и речного стока, без учета метеообстановки. Это необходимо для того, чтобы увидеть, насколько точно воспроизводится динамика вод бассейна в отсутствии ветрового воздействия.

Для оценки качества модели результаты экспериментов будут сравниваться с двумя картами динамики вод Онежского залива: 1. Карта постоянных течений, ранее представленная на рисунке 1.3; 2. Фрагмент карты остаточной приливной циркуляции вод Белого моря, представленный на рисунке 3.1 [28].



Рисунок 3.1 Фрагмент карты остаточной приливной циркуляции вод [28]

Первый эксперимент. В самом начале работы над расчетной областью использование данных о ходе уровня на станции о. Жижгинский не рассматривалось ввиду его географического положения относительно границ криволинейной сетки – остров расположен несколько севернее остальных станций, и приливная волна доходит до него чуть раньше. Тогда, чтобы задать ход уровня на правой границе пролива Восточной Соловецкой Салмы, была использована копия данных об уровне на станции Кемь. Прочие исходные данные остались без изменений. Расчет проводился условно с 1 января 2023 г. и был досрочно завершен 9 января 2023 г.

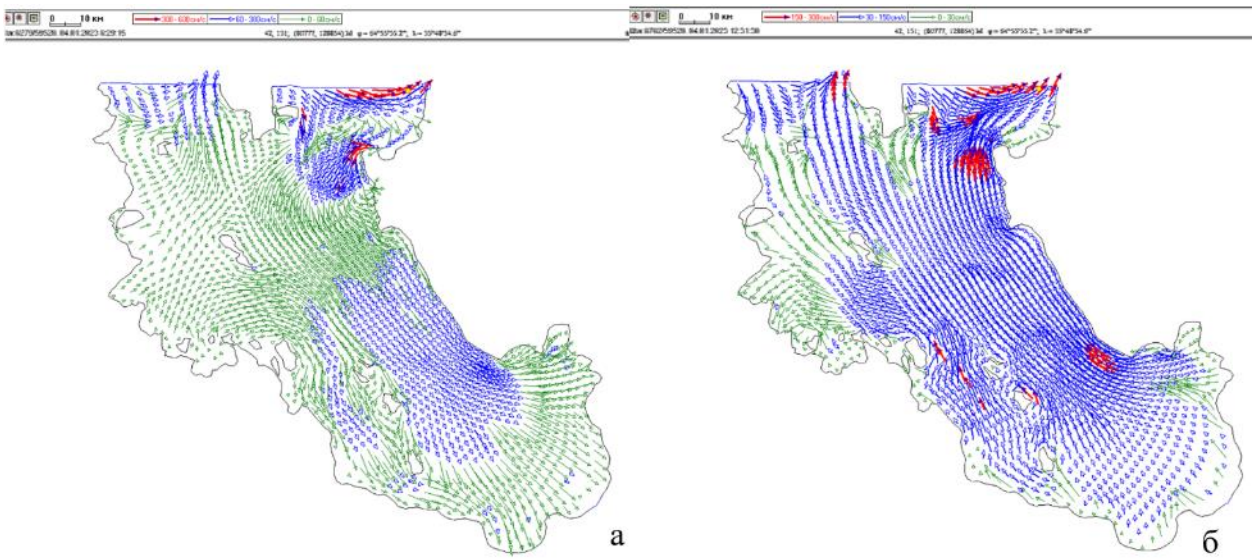


Рисунок 3.2 Результаты эксперимента №1: скорости течения в Онежском заливе на четвертые сутки расчета – прилив (а) и отлив (б)

Основной проблемой при воспроизведении динамики вод являлись необычайно большие скорости течений в проливе Восточная Соловецкая Салма и около мыса Летний Орлов как во время приливной, так и отливной волн (рисунок 3.2). Значения скоростей течений здесь доходили вплоть до 500–700 см/с – это огромные величины, неприемлемые для дальнейшего

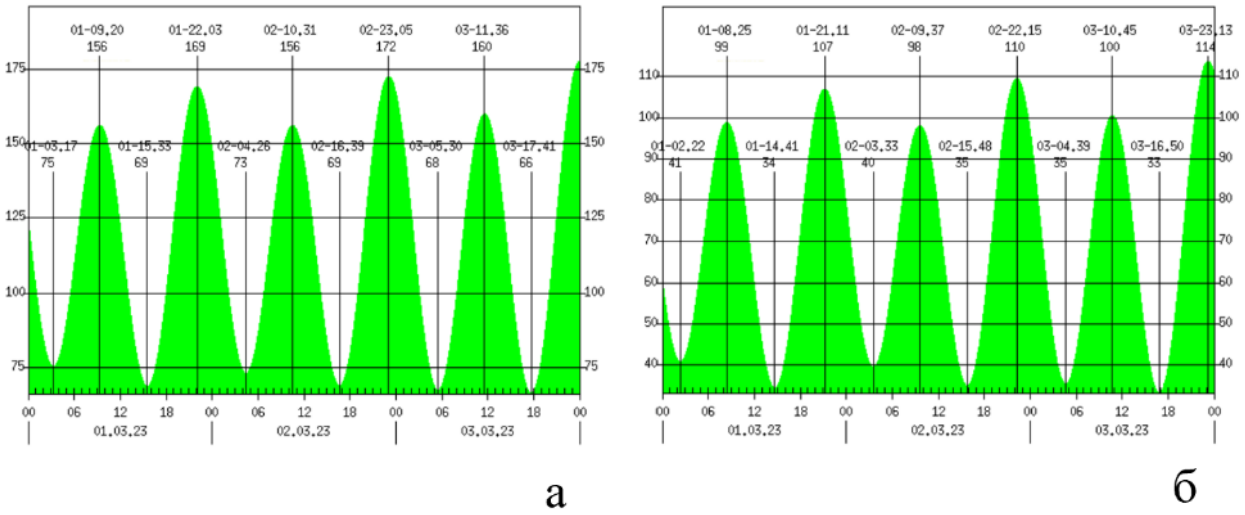
проведения экспериментов по переносу примеси. Они будут негативно влиять на общую картину и, как итог, отражать неверные результаты.

Кроме того, во время отливной волны высокие скорости (>150 см/с) наблюдаются у мыса Глубокий, Кондострова, архипелага Боршовцов и у западного побережья Соловецкого острова. Можно предположить, что это происходит из-за недостаточной «раскачки» модели, однако нет уверенности, что в дальнейшем они уменьшатся. Из-за этого эксперимент решено было прекратить, посчитав неудачным. В дальнейшем вместо копии данных станции Кемь будут использоваться данные станции о. Жижгинский.

Второй эксперимент. На открытых границах в проливе Восточная Соловецкая Салма были заданы следующие условия: на правой границе данные о ходе уровня станции Соловецкий остров, на левой – остров Жижгинский. Расчет проводился условно с 1 января 2023 г.

Как и предполагалось, из-за географических особенностей расположения острова и различий высоты уровня у островной и континентальной части расчет прекратился спустя несколько часов после начала моделирования. В программе возникла ошибка, связанная с переполнением при выполнении операции с плавающей точкой – векторы скоростей вышли за пределы расчетной области (диапазона, допускаемого программой). Этот эксперимент также пришлось признать неудачным.

Третий эксперимент. Ввиду отсутствия альтернативного источника исходных данных об уровне, было решено продолжить использование данные со станции о. Жижгинский, однако провести с ними изменения. Главной проблемой при использовании данных со станции Кемь является разница между глубинами в точках на левой и правой континентальных границах расчетной области. Если обратить внимание на произвольный фрагмент хода уровня на станциях Кемь и Жижгинский остров (рисунок 3.3), можно увидеть, что не только пик малой и большой воды на Жижгинском острове наступает практически на час раньше, чем в Кеми, но и экстремумы уровня значительно меньше.



а б

Рисунок 3.3 Графики хода уровня моря в пункте 'Кемь' (а) и 'Жижгинский остров' (б). Портал ЕСИМО [36]

Предыдущие эксперименты показали, что использование оригинальных значений уровня и в Кеми, и на острове Жижгинский дают неудовлетворительные результаты, поэтому экспериментально (последовательно проводя расчеты для каждого варианта), было установлено, что достаточно хорошее воспроизводство динамики вод Онежского залива можно добиться, используя данные уровня, на 10 см меньше изначальных. Данное допущение было распространено на все значения исходного ряда острова Жижгинский. Расчет проводился также условно с 1 января 2023 г.

На рисунке 3.4 изображены результаты эксперимента № 3, по условным датам, совпадающие с результатами эксперимента № 1. Заметна огромная разница в величинах скоростей и местах их наблюдения. В первом эксперименте во время прилива скорости течений свыше 150 см/с наблюдались повсеместно в области пролива Восточная Соловецкая Салма. Здесь же регистрируются единичные случаи исключительно в проливе Западная Соловецкая Салма, что также можно объяснить недостаточной «раскачкой» модели. Кроме того, стоит выделить более явное проявление приливной волны по сравнению с первым экспериментом. В период отлива области скоростей свыше 200 см/с наблюдаются исключительно около мыса

Летний Орлов, а также единичный случай около острова Большая Муксалма (рисунок 3.4б). Такая ситуация может быть связана с избыточным сгущением линий расчетной сетки. При дальнейшем совершенствовании модели целесообразно детализировать данный участок акватории.

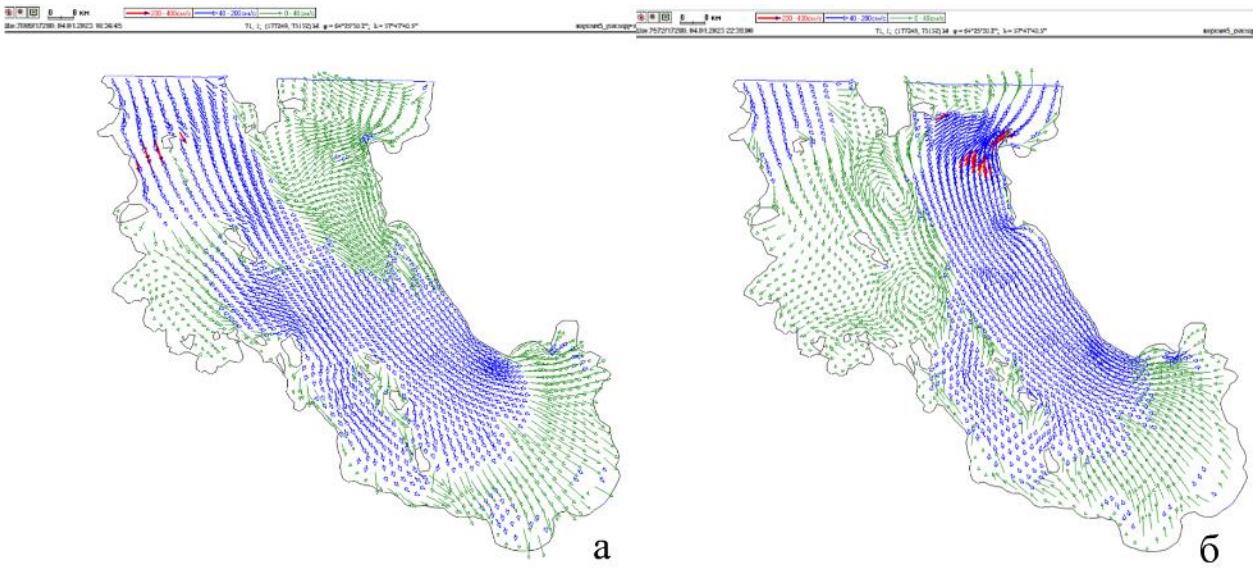


Рисунок 3.4 Результаты эксперимента № 3: скорости течения в Онежском заливе на четвертые сутки расчета – прилив (а) и отлив (б)

Стоит выделить образование двух зон в северной и центральной части акватории, где течения образуют завихренности, чего ранее не происходило (рисунок 3.4б).

В сравнении с результатами первого эксперимента за эту же условную дату, можно сказать, что воспроизведение динамики поверхностных вод происходит значительно лучше. Расчет решено было продолжить до условной даты 1 марта 2023 года.

После приблизительно двух месяцев вычислений было обнаружено, что случаи высоких скоростей во время отлива наблюдаются довольно редко (рисунок 3.5). В основной акватории регистрируются скорости течений, не превышающие 50 см/с. Это было принято достаточным результатом «раскачки» модели для проведения экспериментов с реальными граничными

условиями, начиная с 1 мая 2023 года. Также стоит отметить наличие во время отливной волны двух зон завихренности, уже отмечавшихся ранее. Подобные структуры в северной и центральной частях Онежского залива отмечаются в опубликованных данных (рисунки 1.3 и 3.1). Однако зона завихренности около Соловецких островов в конкретном эксперименте имеет обратное направление относительно приливных течений, представленных на рисунке 1.3.

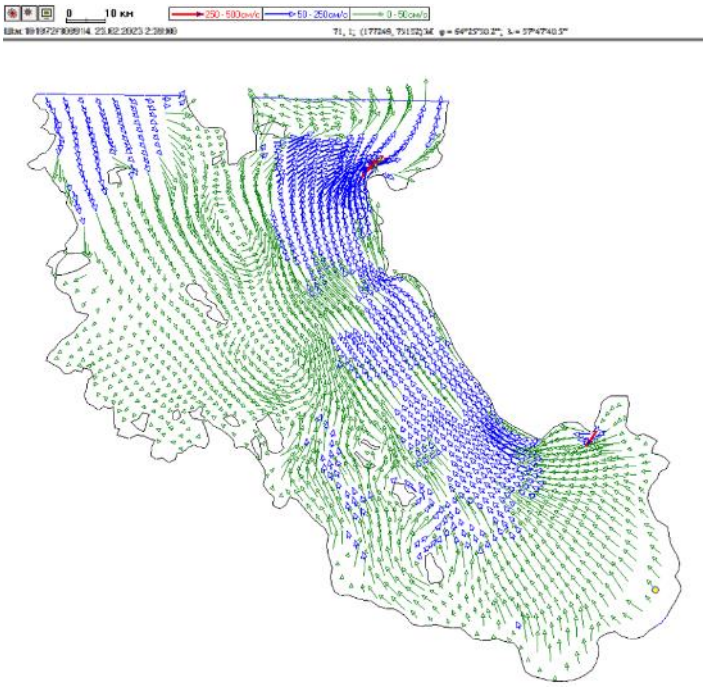


Рисунок 3.5 Результаты эксперимента № 3: скорости течения в Онежском заливе на условную дату 23.02.2023 г.

В целом, эксперимент № 3 считается среди всех наиболее успешным, несмотря на допущения, принятые при его реализации. К сожалению, квазистационарного состояния модели не удалось добиться даже после нескольких месяцев воспроизводства динамики приливно-отливных колебаний. На данный момент нет возможности получить более точный результат, поэтому в одном из следующих экспериментов с добавлением

метеообстановки в качестве основы будет использоваться результат эксперимента № 3.

3.2 Результаты воспроизведения динамики вод с учетом приливно-отливных колебаний, речного стока и синоптической ситуации

Достоверного воспроизведения динамики вод мелководного залива невозможно добиться без включения в ряд исходных данных информации о метеорологической обстановке. В одном эксперименте она была добавлена в начале вычислений, а в другом – подключена дополнительно в процессе основного счета. Ниже представлены результаты этих включений.

Четвертый эксперимент. На раннем этапе рассматривался вариант включения данных о метеообстановке в исходные данные первого эксперимента, предполагая, что ветровое воздействие со временем компенсирует высокие скорости течений в проливе Восточная Соловецкая Салма. Расчет проводился также условно с 1 января и был досрочно остановлен 15 января 2023 г.

На рисунке 3.6 можно увидеть, что область высоких скоростей увеличилась, но неожиданностью это не было: для января и февраля на станции о. Соловецкий преобладающим направлением ветра в 2023 году является 180 °. Предполагалось, что эти месяцы не войдут в результаты эксперимента, а непосредственное наблюдение за динамикой поверхностных вод и ее регистрация начнется с марта, когда преобладающим направлением ветра станет 45 ° (оно и должно было компенсировать высокие скорости). Однако уже 15 января программа выдала ошибку, аналогичную той, что произошла во втором эксперименте. Ветровое воздействие послужило дополнительным фактором увеличения скорости течений до таких масштабов, что ее векторы вновь вышли за пределы расчетной области. Эксперимент признан неудачным.

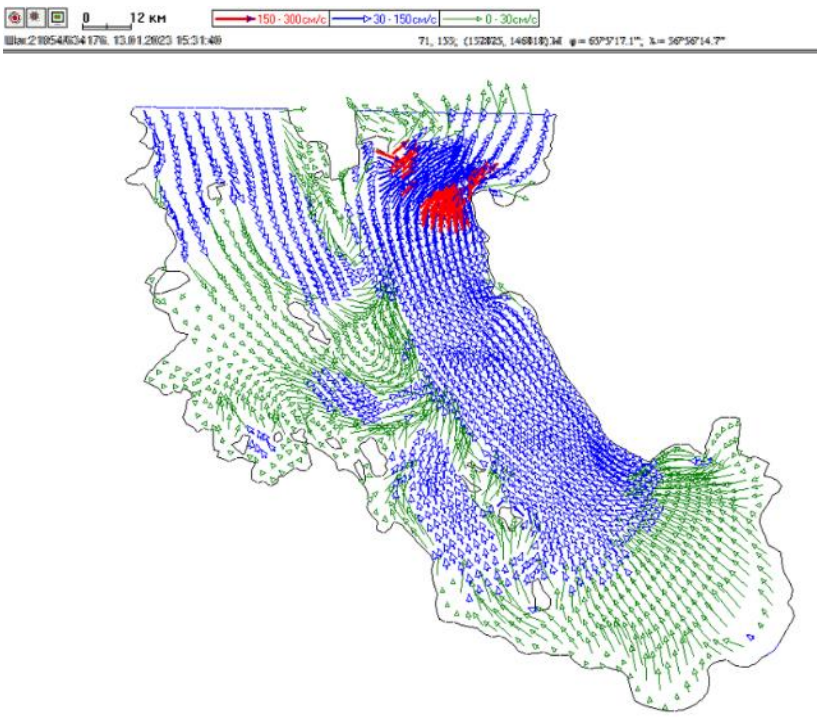


Рисунок 3.6 Результаты эксперимента № 4: скорости течения в Онежском заливе на условную дату 13.01.2023 г.

Пятый эксперимент. Используя в качестве основы результат эксперимента № 3, с условной даты 1 марта 2023 г. была добавлена метеоинформация о скорости и направлениях ветра на станциях Кемь, Соловецкий остров и Онега согласно их описанию в пункте 2.2.

В ходе вычислений с марта по апрель периодичность возникновения высоких скоростей на проблемном участке у мыса Летний Орлов в целом сократилась, однако сами значения все также превышали 200 см/с (рисунок 3.7). С 1 мая 2023 г., когда при расчете стали использоваться фактические данные, возникла тенденция к уменьшению значений скоростей не только в проливе Восточная Соловецкая Салма, но и в целом по всей акватории. Однако единичные случаи наблюдения скоростей течения свыше 200 см/с у мыса Летний Орлов никуда не исчезли, что подтверждает влияние сгущения линий расчетной области. Кроме того, изменений в направлении вихревых структур, обычно возникающих при отливной волне, так и не возникло – оба вихря по-прежнему закручены против часовой стрелки (рисунок 3.7а). Несмотря на это, общий характер направления приливно-

отливных волн сопоставим с опубликованными данными (рисунки 1.3 и 3.1), поэтому эксперимент в целом можно считать успешным.

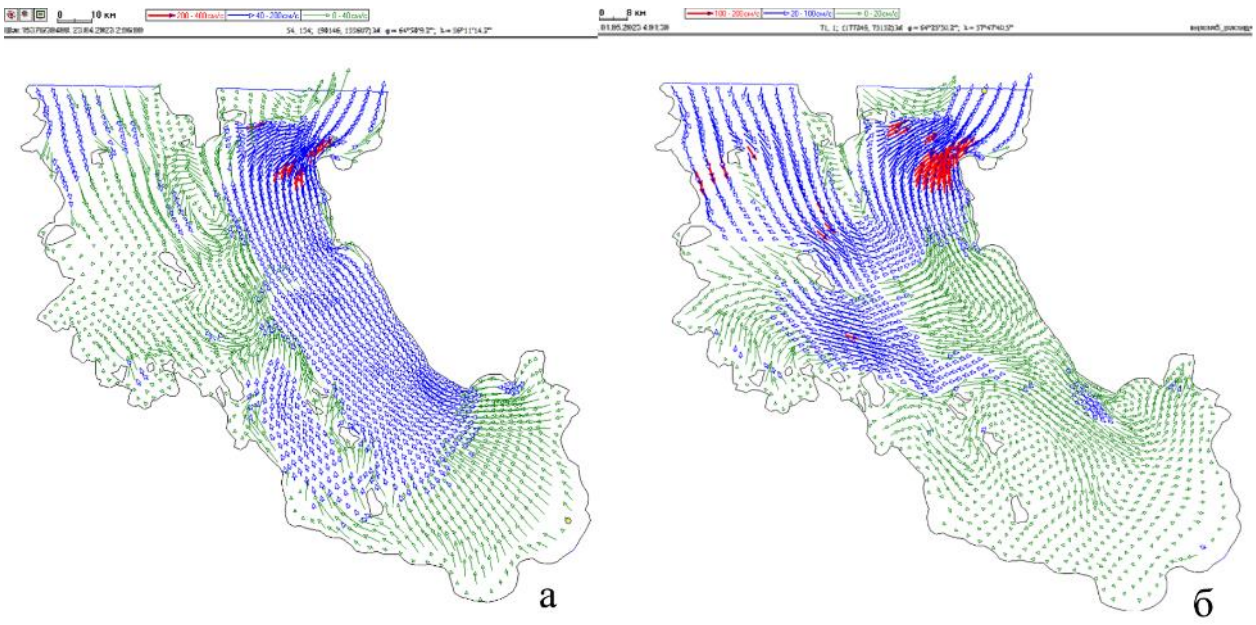


Рисунок 3.7 Результаты эксперимента № 5: скорости течения в Онежском заливе на условную дату 23.04.2023 г. (а) и фактическую дату 01.05.2023 в 04:00 (б)

Вычисления с заданными фактическими данными о расходе реки Онега, ходе уровня в указанных пунктах и метеоданных на станциях Кемь, Онега и Соловецкий остров были выполнены на период продолжительностью 4 месяца. Анализ изменчивости течений показал, что скорости течений в поверхностном слое отражают существующую приливно-отливную динамику вод. Учет ветрового воздействия по данным мая-августа 2023 г. привел к снижению скоростей течений на всей акватории (рисунок 3.8) без существенных изменений направлений течений.

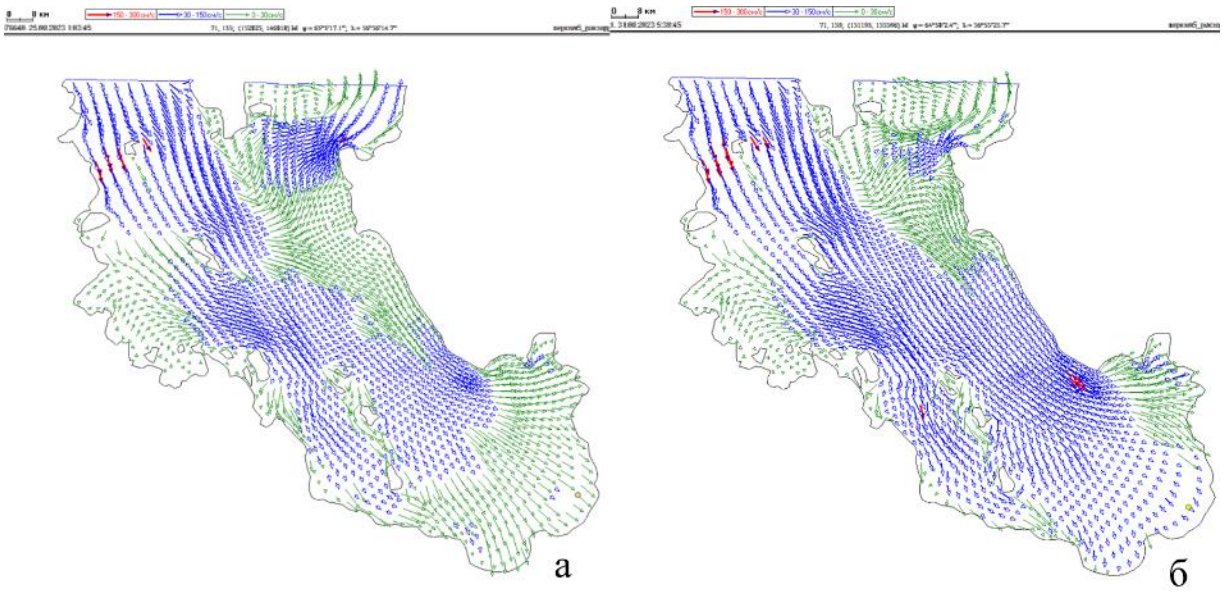


Рисунок 3.8 Продолжение результатов эксперимента № 5: скорости течения в Онежском заливе 25.08.2023 г. (а) и 31.08.2023 (б)

Для дальнейших экспериментов по оценке переноса примеси был выбран сентябрь 2023 года, так как в осенний период более вероятны ветра, близкие к штормовым.

3.3 Результаты воспроизводства переноса примеси в 2023 г. в осенний период

Как уже отмечалось в пункте 1.2, Онежский залив Белого моря является важным промысловым и хозяйственным объектом, в котором активно проводятся мероприятия по развитию его экономического потенциала. Большая антропогенная нагрузка на регион может привести к ухудшению его экологической обстановки, а учитывая, что уже наблюдалась аварийная ситуация с нефтяным танкером типа «река-море» (1 сентября 2003 года [39]), а в последние годы явно прослеживается тенденция на увеличение грузовой нагрузки на морские терминалы Беломорска и Онеги, следует иметь представление о том, как в аварийной ситуации будет распространятся

загрязняющее вещество. Для этого проведем ряд экспериментов, задав в качестве загрязняющего вещества мазут марки «М100», так как он является одним из наиболее распространенных типов топлива. При этом будет рассматриваться только часть нефтепродукта, которая сохраняется в воде в растворенном виде. Эксперименты со взвешенной составляющей нефтепродукта могут быть проведены в дальнейшем.

Следует отметить, что для акватории Онежского залива отмечались повышенные концентрации нефтепродуктов в воде, превышающие 2ПДК [19, 42]. По различным данным [40, 41] после аварии 2003 года на нефтерудовозе «57-М» суммарно в воду попало до 50 тонн нефтепродуктов. Это единственный за последние годы зафиксированный случай сброса мазута в районе Онежского залива, поэтому при задании параметров источника было принято решение ориентироваться именно на этот случай.

Для численного эксперимента объем разлива был принят равным 500 м^3 (примерно в десять раз больше, чем фактически при аварии 2003 года). Сила поверхностного натяжения между нефтью и водой составляет примерно 0,03 Н/м (использовались внутренние настройки ПК CARDINAL [32]). Испарение нефти при расчете учитывается, взмучивание – не учитывается.

Среднее значение плотности мазута марки «М100» около 960–1015 кг/м^3, однако более точные значения при температуре 20°С согласно ГОСТ 10585-2013 [43] официально не нормируются. В работе [44] в результате проведения экспериментов с пробой мазута была определена его точная плотность при температуре 20 °С – ρ=978,36 кг/м^3. Исходя из того, что плотность нефтепродуктов возрастает при уменьшении температуры окружающей среды, а также температуры воды и воздуха в период проведения экспериментов по переносу примеси, было принято среднее значение плотности ρ=980 кг/м^3. Коэффициент неконсервативности λ был рассчитан с использованием таблицы коэффициентов неконсервативности веществ при температуре 20 °С для основания натуральных логарифмов из методических указаний за авторством Резинских З. Г. [45] Для нефтепродуктов

λ=0,043 1/сут. и при пересчете в систему измерения единиц за секунду составил $5{,}09*10^{-5}$ 1/сек.

Коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии Ks в программе задается несколькими эмпирическими выражениями, среди которых присутствуют закон «4/3», формула Смагоринского и выражение, принятое в речной гидравлике.

Использование закона «4/3» в данном случае считается невозможным, так как его применяют как правило в крупномасштабных климатических моделях и в масштабе мелководного залива он может дать неточные результаты. Выражение для речной гидравлики не учитывает процессы, характерные для морских динамических систем. Формула Смагоринского в этом случае подходит куда лучше – она учитывает влияние ветрового и приливно-отливного воздействий на сдвиг поверхностных течений, так как здесь коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии зависит от градиентов скорости.

Формула Смагоринского [32]:

$$K = \gamma_1 \Delta S \sqrt{(\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial y})^2 + 0.5(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})^2}, \quad (10)$$

где ΔS – площадь расчетной ячейки, γ_1 – коэффициент, определяющийся эмпирически и лежащий в пределах 0,05-0,25. В дальнейших расчетах коэффициент γ был задан равным 0,12 – расчетная сетка в целом точная, идет учет стратификации на севере залива и ветрами оказывается достаточно сильное влияние на динамику поверхностных водных масс.

Общее выражение для расчета начального поля концентраций задавалось, как

$$c(0) = \rho_{oil}\theta[r - \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2}]\theta(k - m), \quad (11)$$

где ρ_{oil} – плотность нефтепродукта; θ – функция, обеспечивающая нулевую концентрацию за пределами круга радиусом r; x_n, y_n – координаты точки разлива; k – номер расчетного слоя, начиная со дна; m=i-1 – число вертикальных слоев без учета поверхностного слоя (i – общее число вертикальных слоев).

Допустим, что весь объем мазута вытек за 12 часов. Это соответствует скорости сброса примерно 41,667 кг/час или 0,01157 кг/с. Исходя из этого значения (которое является отношением концентрации загрязняющего вещества к расходу воды в источнике) были заданы два параметра: расход воды, равный 0,1 $м^3$/с, и концентрация нефтепродуктов, равная 0,1157 кг/$м^3$. Температура и соленость воды не учитываются.

Все вышеперечисленные параметры источника примеси одинаковы для каждого из последующих экспериментов.

Области источника примеси располагаются вблизи акваторий терминалов морского порта Онега около городов Онега и Беломорск (рисунок 3.9), так как через эти морские терминалы водным транспортом активно осуществляется транзит нефтепродуктов.

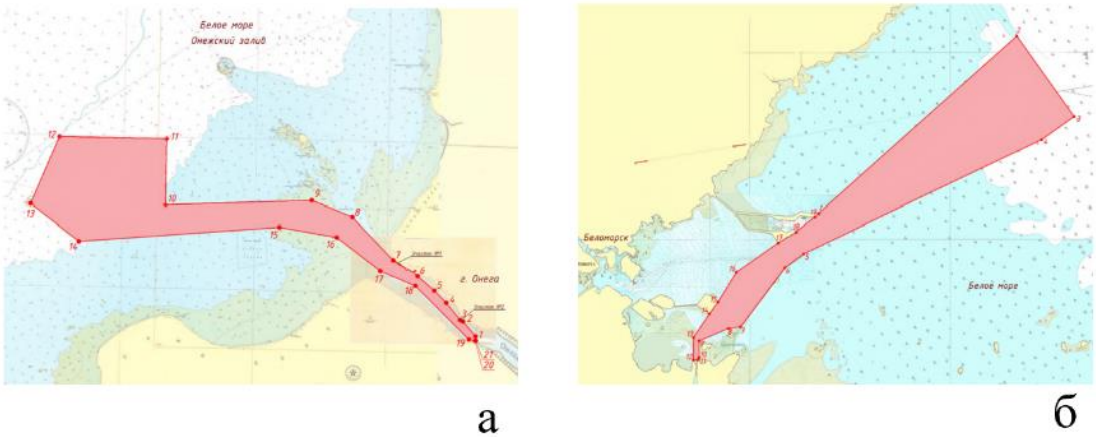


Рисунок 3.9 Границы акватории морского порта Онега (а) и его морского терминала Беломорск (б) [46]

Расчет переноса примеси осуществлялся за два периода: когда в основном наблюдались малые (<5 м/с) и большие (>5 м/с) скорости ветра. Направление ветра в выборе даты начала расчета не учитывалось, определяющим фактором являлись наиболее повторяющиеся скорости ветра. Однако при анализе направления переноса нефтяного пятна учитывалось направление ветра в соответствующие даты. Выбранный период с малыми скоростями ветра – с 1 по 3 сентября; с большими – с 18 по 20 сентября (таблицы 3.1, 3.2). Розы ветров за два вычислительных периода для станций Кемь, Онега и о. Соловецкий представлены на рисунке 3.11.

Таблица 3.1 Повторяемость скоростей ветра для трех станций за период с 1 по 3 сентября 2023 г.

Скорость ветра, м/с	Повторяемость случаев, г. Кемь	Повторяемость случаев, г. Онега	Повторяемость случаев, о. Соловецкий
0	0	0	1
1	8	9	4
2	7	15	6
3	5	1	7
4	2	0	5
5	3	0	1
6	0	0	1
7	0	0	0
8	0	0	0

Таблица 3.2 Повторяемость скоростей ветра для трех станций за период с 18 по 20 сентября 2023 г.

Скорость ветра, м/с	Повторяемость случаев, г. Кемь	Повторяемость случаев, г. Онега	Повторяемость случаев, о. Соловецкий
0	0	1	0
1	0	5	0
2	5	3	1
3	5	3	1
4	2	3	4
5	7	3	9
6	4	3	5
7	0	1	2
8	1	3	2
11	1	-	-
16	-	-	1

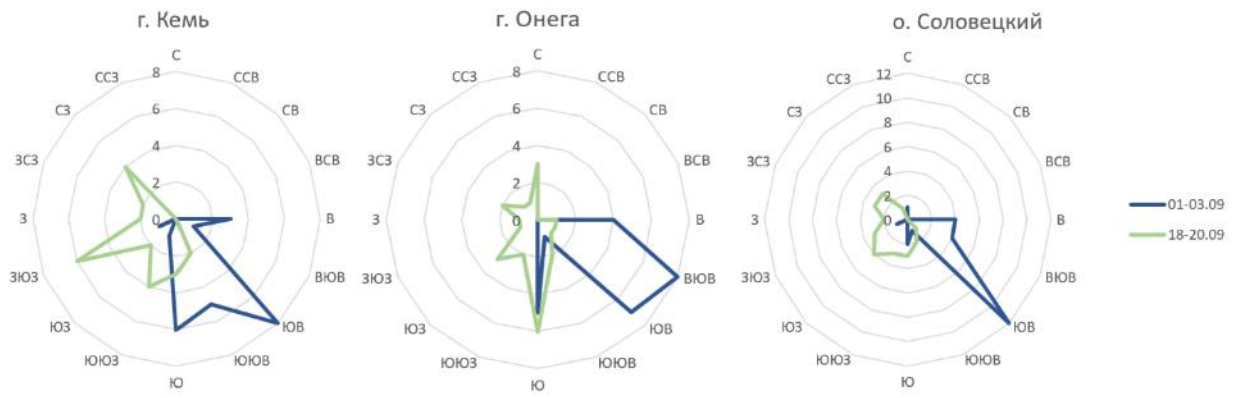


Рисунок 3.10 Розы ветров за два вычислительных периода для станций Кемь, Онега и о. Соловецкий по данным [37]

П е р в ы й э к с п е р и м е н т . Недалеко от акватории морского порта Онега был поставлен источник примеси с исходными данными, изложенными в начале пункта. Дата и время начала моделирования переноса вылившихся нефтепродуктов – 1 сентября 2023 г. 00:00 с фактическими граничными условиями (расходы, уровень, метеорологические характеристики).

Координаты ячейки предполагаемого разлива: x=167501, y=28570. Радиус разлива составил 75 метров (одинаковый для всех последующих экспериментов). Учитывая, что ранее для вычислений была принята трехслойная структура залива, и что источник примеси не может располагаться в поверхностном и донном слоях, его разместили во втором слое. Исходя из этого, выражение для расчета начального поля концентраций представляет собой:

$$c(0) = 980 * \theta[75 - \sqrt{(x - 167501)^2 + (y - 28570)^2}]\theta(k - 2). \qquad (12)$$

Глубина в ячейке, где произошел разлив нефтепродуктов, составляет 12,3 метра, горизонт разлива – 4,7 метров.

Начало разлива нефтепродуктов пришлось на пик малой воды – по данным из портала ЕСИМО 1 сентября 2023 г. в 01:00 [35] уровень воды на станции г. Онега составлял 7 см. Хоть приливно-отливные колебания не

воздействовали так явно на перенос примеси в первые часы, далее это стало определяющим фактором в местоположении разлившегося пятна нефтепродуктов. Исходя из рисунка 3.3 можно увидеть, что наиболее повторяющиеся ветра в период с 1 по 3 сентября близ станции Онега имеют южное направление (Ю, ЮВ, ЮЮВ), причем 1 сентября имели место скорости ветра более 3 м/с. Несмотря на незначительные скорости ветра перемещение пятна нефтепродуктов наблюдалось к северо-северо-западу от источника примеси (рисунок 3.12), что согласуется с дрейфовой составляющей. Далее главным фактором воздействия стали уже приливно-отливные колебания.

При более подробном изучении результатов эксперимента явно прослеживается связь между тем, когда пятно относит от берега и начинающейся фазой отлива в районе порта Онега (все подробные графики хода уровня моря находятся в Приложении Б). Следовательно, при малых ветрах именно приливно-отливные колебания являются фактором, определяющим перемещение пятна нефтепродуктов в прибрежной зоне, а благодаря малым ветрам его не относит к берегу сразу же после разлива. В итоге пятно нефтепродуктов прибилось к береговой линии близ мыса Глубокий только 4 сентября к 8 часам утра (рисунок 3.13). Таким образом численный эксперимент позволяет выявить наиболее уязвимый участок прибрежной зоны.



Рисунок 3.11 Результаты эксперимента № 1: положение в пространстве и изолинии концентраций образовавшегося пятна нефтепродуктов 1 сентября в 00:00 (а), 2 сентября в 00:00 (б), 3 сентября в 00:00 (в) и 4 сентября в 01:00 (г)

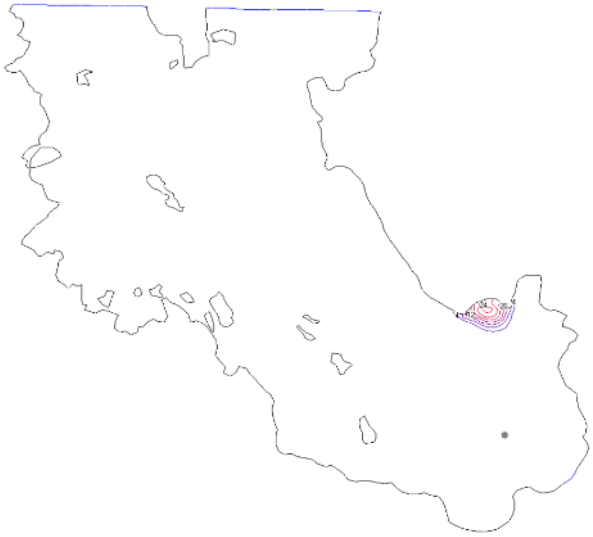


Рисунок 3.12 Продолжение результатов эксперимента № 1: положение в пространстве и изолинии концентраций образовавшегося пятна нефтепродуктов 4 сентября в 23:17

Второй эксперимент. Недалеко от акватории морского порта Онега был поставлен источник примеси с исходными данными, изложенными в начале пункта 3.3. Дата и время начала моделирования переноса вылившихся нефтепродуктов – 18 сентября 2023 г. 00:00 (фактические данные).

Выражение для расчета начального поля концентраций аналогично представленному в первом эксперименте. Глубина и горизонт разлива, соответственно, тоже не менялись.

Начало разлива нефтепродуктов пришлось на середину отливных колебаний – по данным из портала ЕСИМО 18 сентября в 00:00 [35] уровень воды на станции г. Онега составлял 117 см. В этом случае решающее влияние на перенос примеси оказало ветровое воздействие – умеренно-сильные ветра, дующие с запада и северо-запада со средней скоростью 6-8 м/с, направили пятно нефтепродуктов в сторону берега. Зоны осушки нефтяное пятно достигло как раз ко времени пика малой воды (рисунок 3.14б). Когда начался прилив, его «прибило» к береговой линии спустя лишь 4-5 часов после разлива. Оставшееся время наблюдений пятно не покидало эту область. Опасность такого сценария заключается в том, что при теоретическом преобладании в аналогичных ситуациях ветров северо-западных румбов, нефтяное загрязнение может достичь дельты реки Онега и за короткий промежуток времени загрязнить большую часть мелководья вокруг.

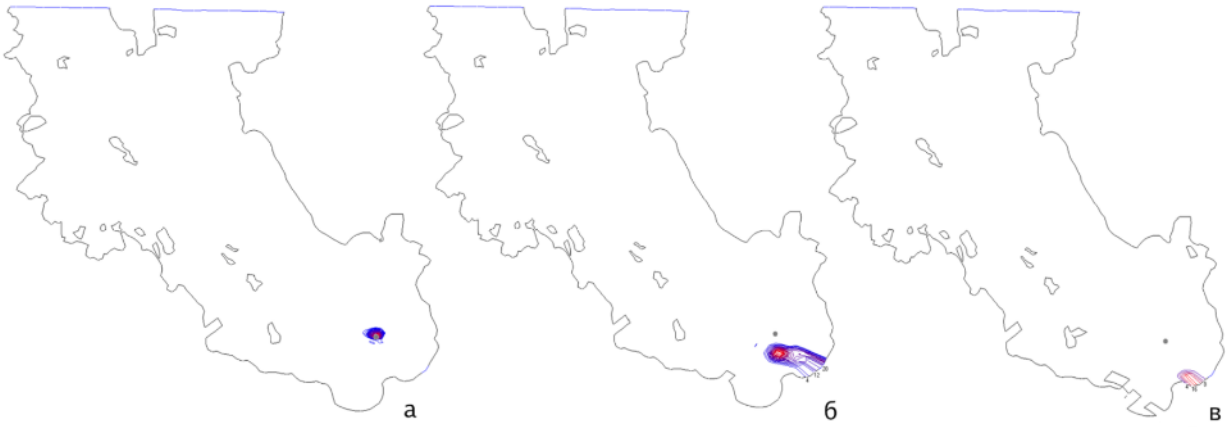


Рисунок 3.13 Результаты эксперимента № 2: положение в пространстве и изолинии концентраций образовавшегося пятна нефтепродуктов 18 сентября в 00:00 (а), в 05:00 (б) и в 18:00 (в)

Третий эксперимент. Недалеко от акватории морского терминала Беломорск морского порта Онега был поставлен источник примеси с исходными данными, изложенными в начале подглавы. Дата и время начала моделирования переноса вылившихся нефтепродуктов – 1 сентября 2023 г. 00:00 (фактические данные).

Координаты ячейки предполагаемого разлива: x=49945, y=87103. Исходя из этого, выражение для расчета начального поля концентраций представляет собой:

$$c(0) = 980 * \theta[75 - \sqrt{(x - 49945)^2 + (y - 87103)^2}]\theta(k - 2). \qquad (13)$$

Глубина в ячейке, где произошел разлив нефтепродуктов, составляет 15,5 метров, горизонт разлива – 5,8 метров.

Начало разлива нефтепродуктов пришлось на середину приливных колебаний – по данным из портала ЕСИМО 1 сентября в 00:00 [35] уровень воды на станции г. Кемь составлял 113 см. Источник разлива находится в районе Сумских шхер – здесь большое количество мелких островов и большой участок залива, вдающегося в сушу, уменьшают приливно-отливное

воздействие. Если обратиться к результатам предыдущих экспериментов по воспроизведению динамики залива (пункт 3.2), можно увидеть, что скорости поверхностных течений в этом районе редко достигают 30-40 см/с. Относительно слабые ветра юго-восточного направления (2–3 м/с), а также близость источника примеси к суше, обеспечили перенос нефтяного пятна к береговой линии близ мыса Выгнаволок. Явное воздействие приливно-отливных колебаний можно проследить только в период отлива-малой воды с 18 до 23 часов 1 сентября, когда нефтяное пятно вынесло из шхер к северу. В остальное время после этого пятно практически не меняло своего местоположения вблизи осторовов Шуйостров и Медвежий, прибитое и расползающееся вдоль береговой линии. Со временем концентрация нефтепродукта снижалась из-за испарения и перераспределения в акватории. В основном в эти два дня в Беломорске наблюдались слабые ветра румбов: ВЮВ и ЮВ первого, ВЮВ и ЮЮЗ второго сентября.

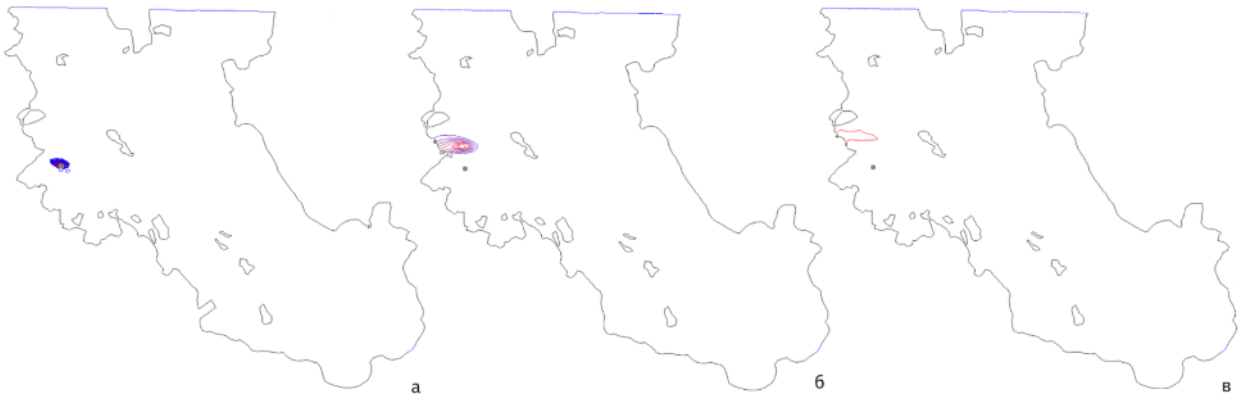


Рисунок 3.14 Результаты эксперимента № 3: положение в пространстве и изолинии концентраций образовавшегося пятна нефтепродуктов 1 сентября в 00:00 (а), в 19:00 (б), и 2 сентября в 19:30 (в)

Четвертый эксперимент. Недалеко от акватории морского терминала Беломорск морского порта Онега был поставлен источник примеси с исходными данными, изложенными в начале подглавы. Дата и время начала

моделирования переноса вылившихся нефтепродуктов – 18 сентября 2023 г. 00:00 (фактические данные).

Выражение для расчета начального поля концентраций аналогично представленному в третьем эксперименте. Глубина и горизонт разлива, соответственно, тоже не менялись.

Начало разлива нефтепродуктов пришлось на период малой воды – по данным из портала ЕСИМО 1 сентября в 00:00 [35] уровень воды на станции г. Кемь составлял 63 см. В первые сутки у Беломорска наблюдался слабый ветер в пределах 4 м/с северо-западного и северного направлений. Под ветровым воздействием нефтяное пятно относительно быстро (примерно за 12 часов) отнесло к Сумской губе, где оно «застряло» между островами и стало стремительно расползаться. Наибольшие концентрации загрязняющего вещества наблюдались у острова Разострова и были равны 40 мг/л. В первой половине дня 19 сентября под действием слабых (4-5 м/с) юго-западных ветров оставшуюся часть пятна стало относить в сторону открытого моря и уже к часу дня оно вышло из Сумской губы. 20 сентября около Разнаволока (более близких станций наблюдения за погодой в районе нет) [37] господствовал умеренный (5-7 м/с) ветер юго-западного и южного направлений, относя пятно дальше в открытое море сначала в сторону островов Большой и Малый Жужмуи, а затем к Онежскому берегу, где близ мыса Чесменский в 23 часа остаточное пятно снова достигло суши. Концентрация примеси в нем уже составляла не более 4 мг/л.

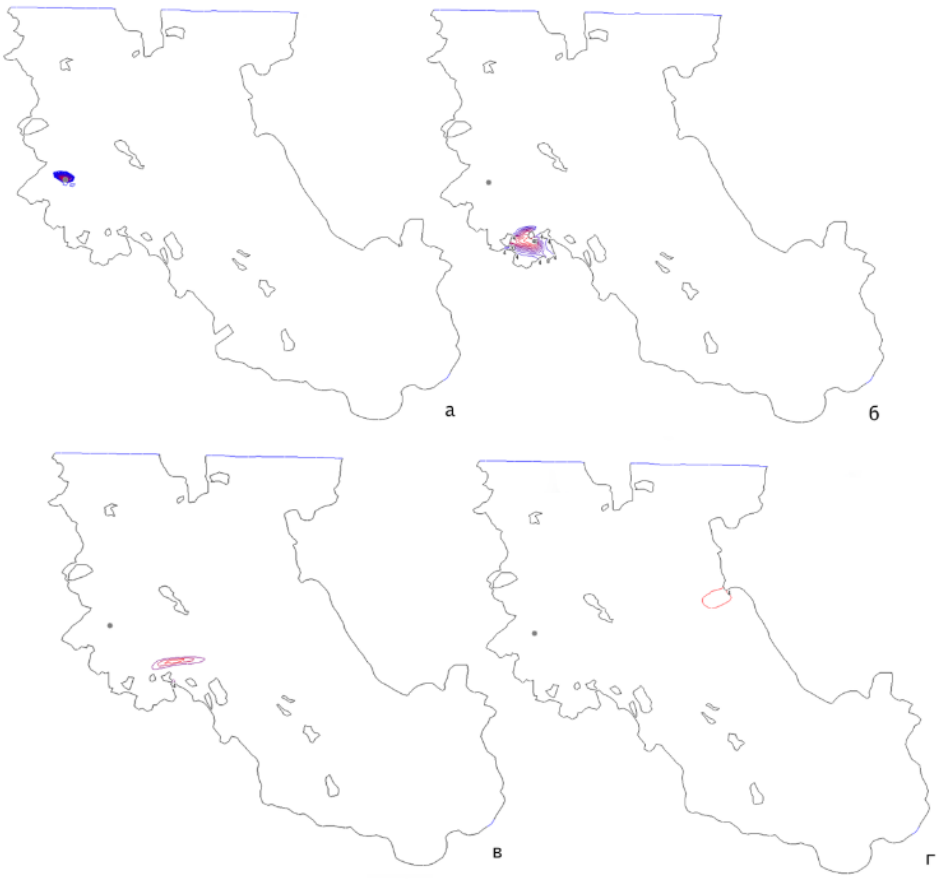


Рисунок 3.15 Результаты эксперимента № 4: положение в пространстве и изолинии концентраций образовавшегося пятна нефтепродуктов 18 сентября в 00:00 (а), в 21:00 (б), 19 сентября в 11:00 (в) и 21 сентября в 01:00 (г)

Полученные в результате проведения четырех экспериментов результаты говорят о значительном преобладании ветрового в сравнении с приливно-отливным воздействием на перенос примеси в районе морского порта Онега, если рассматриваются как минимум умеренные скорости ветра (от 5–7 м/с), весомом воздействии приливно-отливных процессов в отсутствии ветра и равнозначном вкладе двух этих процессов при слабых скоростях ветра (3–5 м/с). Около морского терминала Беломорск, расположенного в Сумских шхерах, приливно-отливное воздействие значительно меньше ввиду географических особенностей и визуально становится заметным только при выходе пятна примеси из Сумских шхер в открытое море. Ветровое

воздействие, каким бы слабым оно ни было, все равно носит здесь определяющий характер.

По данным натурных наблюдений в результате аварийного разлива нефтепродуктов в 2003 году в водах Онежского залива сохранялись повышенные концентрации в придонном слое в 2005 году (рисунок 3.16). По результатам исследований 2011 года на удаленных от берега участках концентрации оказались сопоставимыми с наблюдавшимися в 2005 г., но уже к летнему сезону 2012 г. концентрации углеводородов у мыса Глубокий снизились до уровня ПДК [47].

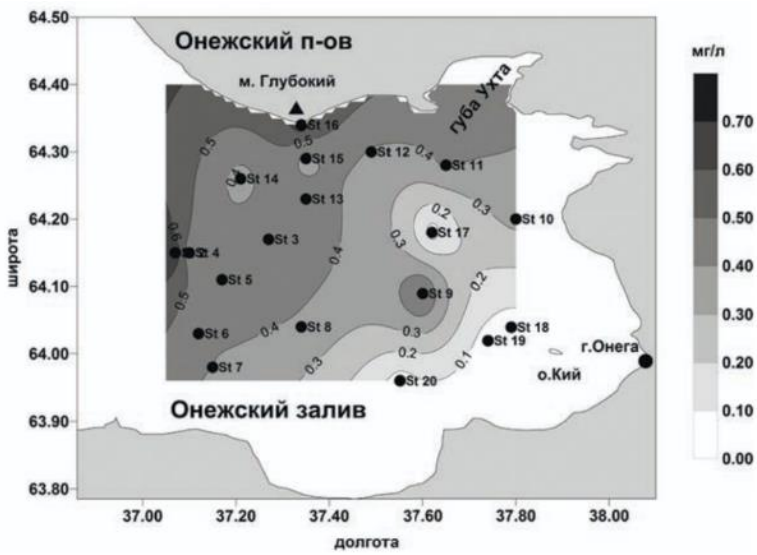


Рисунок 3.16 Распределение углеводородов в придонном слое воды у мыса Глубокий в июле 2005 года [47]

Проведенные эксперименты показывают сложную динамику перемещения пятна нефтепродукта в условиях совместного влияния приливо-отливных явлений и ветрового воздействия в Онежском заливе. Это необходимо учитывать при оценке вероятного распространения загрязнения при разливе нефтепродуктов.

В дальнейших исследованиях можно будет рассмотреть перенос примеси из источника, действие которого не ограничено во времени –

например, перенос загрязненных сточных вод, поступающих вместе со стоком реки Онега. Тогда отслеживание влияния ветра и полусуточных приливов на динамику примеси станет еще более точным, ведь будет возможность отслеживать ее местоположение и концентрацию не только в районе, куда ее выносит со временем, но и непосредственно вблизи источника разлива.

Заключение

Подводя итоги выполненного исследования, перечислим основные результаты:

- на основании опубликованных источников дана краткая физико-географическая характеристика Онежского залива Белого моря, выделены и рассмотрены основные факторы, определяющие динамику его вод;
- рассмотрена хозяйственная деятельность в акватории залива и прибрежной зоне, показано увеличение нагрузки на морской порт Онега и грузооборота в Беломорско-Балтийском канале, что может негативно сказаться на качестве вод;
- на базе ПК CARDINAL реализована численная модель динамики вод и переноса примеси в Онежском заливе;
- проанализированы гидрологические условия (расходы реки Онега, ход уровня на станциях Кемь, Соловецкий и Жижгинский острова) и изменчивость метеорологических характеристик на примере 2023 года для задания граничных условий;
- выполнены численные эксперименты по расчету динамики вод в безледный период 2023 года, показано, что модель воспроизводит основные черты системы течений Онежского залива;
- выявлены недостатки разрешения расчетной области, приводящие к повышенным скоростям на участке пролива Восточной Соловецкой Салмы и у мыса Летний Орлов;
- численные эксперименты по расчету переноса нефтепродуктов от кратковременных источников загрязнения (возможные аварийные ситуации) позволили проследить особенности распространения нефтяных пятен при воздействии слабых и умеренных ветров для

разных участков акватории (районы морского порта Онега и морского терминала Беломорск);

- при ветрах определенных направлений нефтяное пятно выносится в зону мелководья, что может способствовать накоплению нефтепродуктов в донных отложениях и последующему вторичному загрязнению, что уже отмечалось для данной акватории.

Таким образом, реализованная численная модель Онежского залива, несмотря на необходимость дальнейшей модернизации расчетной области, может быть использована для выявления зон наиболее вероятного накопления загрязняющих веществ в донных отложениях, что особенно важно для мелководных заливов в зоне активной хозяйственной деятельности.

Список использованной литературы

1. Моря России — Белое море // GeographyofRussia.com : [сайт]. – 2015. – URL: https://geographyofrussia.com/morya-rossii-beloe-more/ (дата обращения: 02.03.2026). – Текст : электронный.
2. Белое море // Моря СССР : [сайт]. – URL: https://tapemark.narod.ru/more/10.html (дата обращения: 04.06.2026). – Текст : электронный.
3. Максимова М. П. Гидрохимический и гидрологический режим прибрежной зоны Белого моря. Марикультура: моногр. / М. П. Максимова, В. А. Чугайнова. – М.: ИИУ МГОУ, 2014. – 200 с.
4. Онежский залив // Большая российская энциклопедия : [сайт]. – URL: https://old.bigenc.ru/geography/text/2689439 (дата обращения: 03.03.2026). – Текст : электронный.
5. Онежский залив Белого моря // Arktikfish : [сайт]. – URL: https://barenzevo.arktikfish.com/ostrova-barentseva-morya/onezhskij-zaliv-belogo-morya (дата обращения: 20.05.2026). – Текст : электронный.
6. Островский Б. Г. Белое море / Б. Г. Островский. – Архангельск : Северное издательство, 1937. – 93 с.
7. Ермакова Г. С. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Онега / Г. С. Ермакова, А. А. Сапожникова, И. Ю. Милютина, Е. А. Ракчеева [и др.] ; под ред. О. В. Горелиц, Г. С. Ермаковой, Г. Ш. Турсуновой ; ФГБУ «ГОИН». – Воронеж : АО «Воронежская областная типография», 2023. – 334 с.
8. Бабков А. И. Гидрология Белого моря, изд. Зоологический институт РАН Беломорская биологическая станция им. академика О. А. Скарлато, 1998, 94 с.
9. Атлас — Белое море : гидрометеорология прибрежной зоны : [сайт] / Государственный океанографический институт. – Москва, 2001-2026. –

URL: http://www.esimo.ru/atlas/Beloe/2_wavesheight.html (дата обращения: 20.04.2026). – Текст : электронный.

10. Температура и соленость воды // Архив погоды. Гидрометеорологические данные : [сайт]. – URL: https://arhpogoda.ru/chast-2-1-temperatura-i-solenost-vody (дата обращения: 23.05.2026). – Текст : электронный.
11. Климовский Н. В. Пространственная и сезонно-годовая динамика поллютантов в воде и донных отложениях Белого моря / Н. В. Климовский / ФГБУН ФИЦКИА им. акад. Н. П. Лаверова УрО РАН. – Архангельск, 2021. – 150 с.
12. Толстиков А. В. Оценка теплового стока рек водосбора Белого моря / А. В. Толстиков, А. Ф. Балаганский, И. А. Чернов // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2021. – № 2. – С. 1–11.
13. Булавина А. С. Дефицит солености как показатель воздействия речного стока на морскую среду / С. Л. Дженюк, А. С. Булавина // Наука Юга России. 2017. Т. 13, № 2. С. 50–59.
14. Лебедев С. А. Исследование сезонной межгодовой изменчивости ветрового волнения режима Белого моря по данным спутниковой альтиметрии / С. А. Лебедев, А. Г. Костяной, Е. А. Костяная, И. В. Серых, П. Н. Кравченко // XVIII Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»
15. Назарова Л. Е. Атмосферные осадки на территории водосбора Белого моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 16–25.
16. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том II, Белое море, выпуск 1, Гидрометеорологические условия / под ред. Ф. С. Терзиева ; редколлегия: Ф. С. Терзиев (отв. ред.), Н. П. Гонтарев, В. И. Калацкий [и др.]. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1991. – 240 с.

17. Баклагин В. Н. Многолетняя изменчивость сплоченности льда в районе Соловецких островов / В. Н. Баклагин, Ю. Н. Лукина // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 9. – С. 6–10.
18. Белое море // Природа России : [сайт]. – URL: http://www.priroda.ru/regions/water/detail.php?SECTION_ID=292&FO_ID=500&ID=5973 (дата обращения: 20.04.2026). – Текст : электронный.
19. Качество поверхностных вод Российской Федерации : Ежегодник. 2024 / Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрохимический институт» ; главный редактор М. М. Трофимчук. – Ростов-на-Дону : ФГБУ «Гидрохимический институт», 2024. – 449 с.
20. Евдокимова В. П. Содержание селена в водных объектах Архангельской области, Белого и Баренцева морей / В. П. Евдокимова, Ю. А. Бахматова. – 9 с.
21. Бамбуляк А. Транспортировка нефти из российской части Баренцева Региона : по состоянию на январь 2005 года / А. Бамбуляк, Б. Франсен ; Сванховд Экологический Центр. – 2005. – 91 с.
22. Начал работу рейдовый нефтетерминал в Онеге // RZD-Partner.ru : [сайт]. – 2003. – 25 июня. – URL: https://www.rzd-partner.ru/other/news/226946/ (дата обращения: 03.04.2026). – Текст : электронный.
23. На Беломорканале в ходе навигации провели более 8,5 тыс. шлюзований // Корабел.ру : [сайт]. – 2025. – 25 нояб. – URL: https://www.korabel.ru/news/comments/na_belomorkanale_v_hode_navigacii_proveli_bolee_8_5_tys_shlyuzovaniy.html (дата обращения: 03.04.2026). – Текст : электронный.
24. Большие планы малого порта Онега // Морские вести России : [сайт]. – 2022. – 10 июля. – URL: https://morvesti.ru/exclusive/96743/ (дата обращения: 03.04.2026). – Текст : электронный.
25. ФГБУ «Администрация морских портов Западной Арктики». План управления судовыми отходами в морском порту Онега : версия от 05.03.2026. – Онега, 2026. – 37 с.

26. Почему не востребованы богатые запасы сельди в Белом море? / Д. Кривоногова // Российская газета : [сайт]. – 2021. – 9 февр. – URL: https://rg.ru/2021/02/09/reg-szfo/pochemu-ne-vostrebovany-bogatye-zapasy-seldi-v-belom-more.html (дата обращения: 20.04.2026). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст : электронный.
27. Фролов С. Б. Состояние запасов и перспективы использования беломорской сельди / С. Б. Фролов, В. И. Зубов, М. А. Носов // Вопросы рыболовства, 2022. Том 23. №2. С. 143-154
28. Океанографические условия и биологическая продуктивность Белого моря : аннотированный атлас / под науч. рук. О. А. Скарлато. – Мурманск : ПИНРО, 1991. – 115 с.
29. Стасенков В. А. Многолетняя динамика биологических показателей наваги Eleginus nawaga (Walbaum, 1792) Белого моря в связи с изменениями температурного режима водоема / В. А. Стасенков // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 370–380.
30. Зеленков В. М. Белое море как водоем промышленной марикультуры // Рыбное хозяйство, 2006. №4. С. 56–57
31. Выполненные работы по гидрологии с использованием программы «CARDINAL» // Cardinal-hydrosoft.ru : [сайт]. – 2020. – 14 апр. – URL: http://cardinal-hydrosoft.ru/?page_id=149 (дата обращения: 05.04.2026).
32. Клеванный К. А. CARDINAL. Руководство пользователя. Версия М / К. А. Клеванный ; ООО «Гидрософт». – 213 с.
33. Карта глубин Онежского залива в лоции 1988 года: [сайт]. – URL: http://www.etomesto.ru/map-arhangelsk_solovki_onezhskiy-zaliv-1988/ (дата обращения: 08.04.2026). – Текст : электронный.
34. Росгидромет. Среднесуточные расходы воды рек, ручьев, каналов по постам за 2023 год : таблицы / Росгидромет. – URL: https://disk.yandex.ru/d/6hL_qWMAagqC6w/ (дата обращения: 23.04.2026). – Текст : электронный.

35. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Анализ временных рядов». – 33 с.
36. Приливы // ЕСИМО (Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане) : [сайт]. – URL: http://esimo.oceanography.ru/tides/ (дата обращения: 23.04.2026). – Текст : электронный.
37. Зимин А. В. Субприливные процессы и явления в Белом море. // М.: ГЕОС, 2018. – 220 с.
38. Расписание Погоды : прогнозы погоды, фактические данные, архив погоды : [сайт] / ООО «Расписание Погоды». – Санкт-Петербург, 2004–2026. – URL: https://rp5.ru/ (дата обращения: 23.04.2026). – Текст : электронный.
39. В Онежской губе Белого моря произошла экологическая катастрофа // Правда.Ру : [сайт]. – 2003. – 4 сент. – URL: https://www.pravda.ru/districts/38178-razlivneft/ (дата обращения: 27.05.2026). – Текст : электронный.
40. В Онежской губе с поверхности воды собирают нефтяную пленку // 29.ru : [сайт]. – 2003. – 5 сент. – URL: https://29.ru/text/gorod/2003/09/05/60055161/ (дата обращения: 27.05.2026). – Текст : электронный.
41. Андрианов В. В. Последствия аварийного разлива нефтепродуктов в южной части Онежского залива Белого моря / В. В. Андрианов, А. А. Лебедев, Л. Р. Лукин, Н. В. Неверова. – 2012. – 8 с.
42. Качество поверхностных вод Российской Федерации : Ежегодник. 2023 / Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрохимический институт» ; главный редактор М. М. Трофимчук. – Ростов-на-Дону : ФГБУ «Гидрохимический институт», 2023. – 594 с.
43. ГОСТ 10585-2013. Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия : межгосударственный стандарт : дата введения 2015-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

44. Забродин А. Г. Анализ физико-механических свойств мазута марки М100 / А. Г. Забродин, С. Я. Алибеков, Н. А. Забродина, Р. С. Сальманов, А. В. Маряшев // КиберЛенинка : науч. электрон. б-ка. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-fiziko-mehanicheskih-svoystv-mazuta-marki-m100 (дата обращения: 27.05.2026). – Текст : электронный.
45. Резинских З. Г. Расчет, нормирование и контроль выбросов и сбросов загрязняющих веществ : методические указания (для практических занятий, курсового и дипломного проектирования) : часть 1 / З. Г. Резинских ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет, Кафедра физико-химической технологии защиты биосферы. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2012. – 42 с.
46. Морской порт Онега // ФГБУ «Администрация морских портов Западной Арктики» : [сайт]. – URL: https://mapm.ru/Port/Onega (дата обращения: 27.05.2026). – Текст : электронный.
47. Андрианов В. В. Последствия аварийного разлива нефтепродуктов в южной части Онежского залива Белого моря / В. В. Андрианов, А. А. Лебедев, Л. Р. Лукин, Н. В. Неверова. – 2012. – 8 с.

Приложение А Исходные данные о среднесуточном расходе р. Онега

Таблица А.1 Исходные данные о среднесуточном расходе р. Онега гидрологического поста р. Онега – с. Порог за 2023 г. [34]

Код поста	70842											
Год	2023											
Река-пост	ОНЕГА - р.Онега - с.Порог											
Число	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1					2980	623 ^	247	606	265	273	510	
2					3130	611	240	611	261	265 _	482	
3					3200	590	236	629	261	277	469	
4					3240 ^	575	236	646	258	280	469	
5					3230 ^	565	233	657 ^	254	328	487	
6					3190	560	233	657 ^	250	410	520	
7					3100	565	240	634	250	500	555	
8					2950	560	247	611	250	565	651	
9					2760	550	243	580	254	606	806	
10					2580	545	236	555	250	585	944	
11					2440	555	230	525	240	575	1050	
12					2300	540	219	505	233	570	1110	
13					2150	510	210	478	233	595	1130 ^	
14					2020	487	201	451	230	680	1110	
15					1880	464	194	433	226 _	757	1060	
16					1700	446	191 _	424	230	825		
17					1570	419	194	406	236	875		
18					1450	397	197	389	233	900		
19					1340	376	201	381	243	913 ^		
20					1240	352	207	372	240	887		
21					1140	336	219	360	236	869		
22					1060	328	240	344	240	818		
23					1000	320	258	336	236	769		
24					950	304	292	324	240	727		
25					900	296	352	316	243	709		
26					856	292	406	304	254	669		
27					825	284	464	296	254	640		
28					787	273	535	288	265	611		
29					745	265	580	280	265	580		
30		-			709	254 _	600 ^	277	269 ^	560		
31		-		-	674 _	-	600 ^	269 _	-	530	-	
Декада												
1					3040	574	239	619	255	409	589	
2					1810	455	204	436	234	758		
3					877	295	413	309	250	680		
Средн.					1870	441	290	450	247	618		
Наиб.					3240	623	600	657	269	913	1130	
Наим.					669	254	191	269	226	265		

Таблица А.2. Исходные данные о среднесуточном расходе р. Онега гидрологического поста р. Онега – с. Турчасово за 2023 г. [34]

Код поста	70011											
Год	2023											
Река-пост	ОНЕГА - р.Онега - с.Турчасово											
Число	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	172	151	137	174 _	2430	525 ^	224	498	240 ^	194 _	385	311 ^
2	173 ^	153	136	177	2520 ^	505	215	518	236	196 _	378	305
3	172	153	134	183	2530 ^	498	207	538	230	198	373	293
4	171	157 ^	134	188	2510 ^	478	207	545 ^	226	213	373	286
5	171	157 ^	134	189	2460	460	217	535	221	249	378	278
6	168	155	133	194	2360	455	226	520	221	280	394	266
7	165	154	132 _	200	2210	455	228	500	221	326	440	263
8	162	156	132	208	2040	440	221	478	226	355	523	251
9	160	153	133	214	1880	425	215	460	213	359	614	246
10	156	152	133	219	1720	423	205	440	198	353	713	240
11	154	150	132	230	1570	408	196	420	191	339	776	245
12	154	150	133	241	1460	387	188	396	192	350	811 ^	244
13	153	150	133	251	1360	376	176	378	192	399	811 ^	247
14	152 _	150	132	257	1270	373	175	362	194	460	789	245
15	154	149	132 _	262	1190	362	173 _	350	198	505	757	242
16	155	147	134	267	1120	350	180	339	200	545	727	247
17	157	146	139	285	1050	332	188	328	202	593	613	247
18	157	145	141	298	993	317	191	321	198	629 ^	508	244
19	157	144	144	326	946	301	192	315	189 _	619	423	248
20	161	143	145	370	897	293	192	306	196	598	366	252
21	159	141	145	434	842	284	196	291	194	578	355	253
22	158	139	145	526	798	276	194	287	191	555	344	252
23	157	137	146	670	754	263	213	278	198	538	333	252
24	161	136 _	148	774	719	261	261	272	194	520	322	254
25	161	136 _	153	976	690	261	289	263	191	500	311	256
26	161	137	155	1170	666	257	332	257	192	475	300	255
27	157	137	158	1460	647	253	403	255	196	460	294 _	255
28	156	137	164	1780	629	245	448	247	192	443	298	249
29	153		168	2060	593	238	468	240	194	433	303	245
30	153	-	168	2280 ^	563	232 _	480	236	196	415	306	238
31	152 _	-	169 ^	-	545 _	-	488 ^	236 _	-	396	-	231 _
Декада												
1	167	154	134	195	2270	466	217	503	223	272	457	274
2	155	147	137	279	1190	350	185	352	195	504	658	246
3	157	138	156	1210	677	257	343	260	194	483	317	249
Средн.	160	147	143	562	1350	358	251	368	204	422	477	256
Наиб.	173	157	169	2340	2530	533	490	545	240	632	814	311
Наим.	152	136	131	173	540	230	173	234	188	194	292	230

Приложение Б Графики хода уровня моря

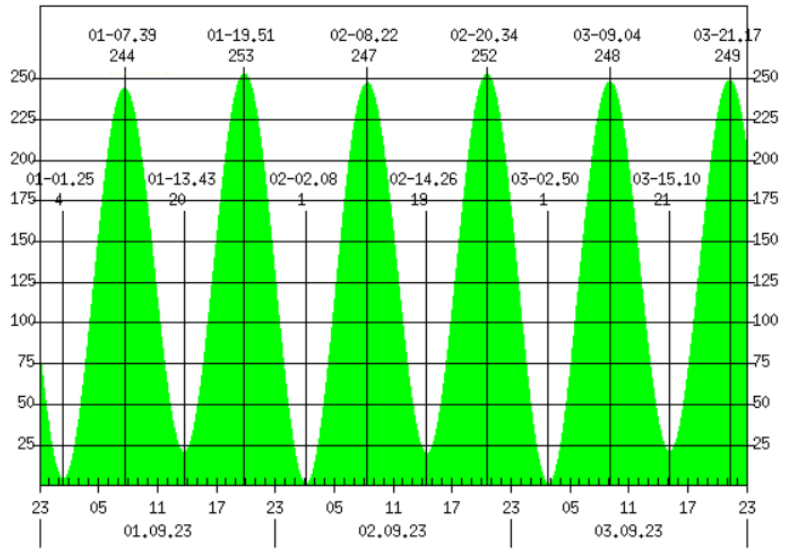


Рисунок Б.1. График хода уровня моря и негармонические постоянные в пункте «Онега», полученные из портала ЕСИМО, за 1-3 сентября 2023 г. [36]

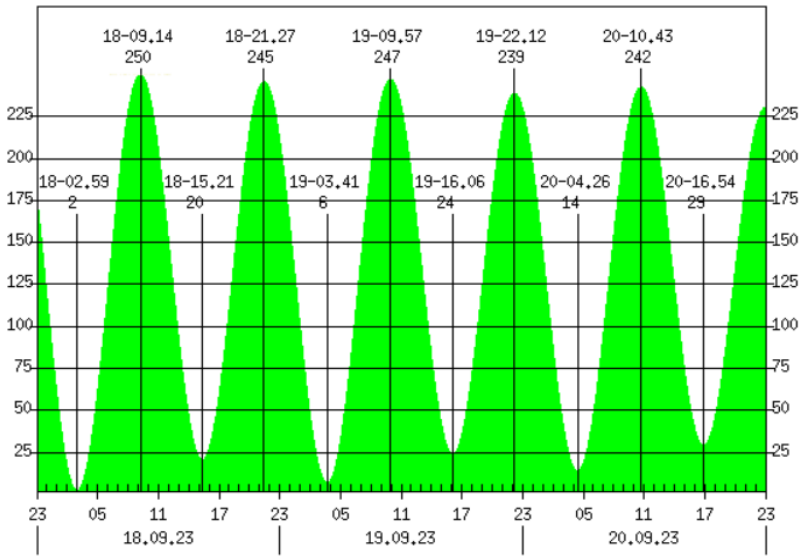


Рисунок Б.2. График хода уровня моря и негармонические постоянные в пункте «Онега», полученные из портала ЕСИМО, за 18-20 сентября 2023 г. [36]

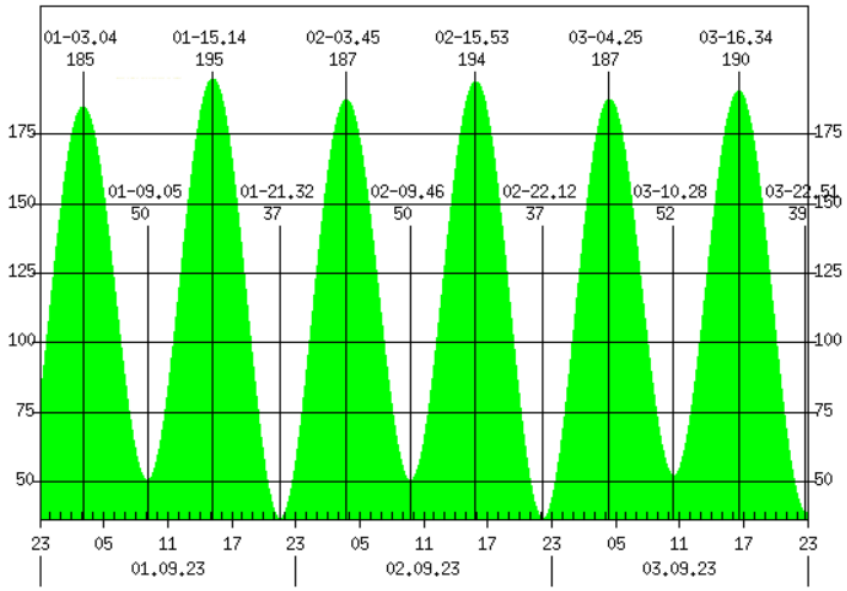


Рисунок Б.3. График хода уровня моря и негармонические постоянные в пункте «Кемь», полученные из портала ЕСИМО, за 1-3 сентября 2023 г. [36]

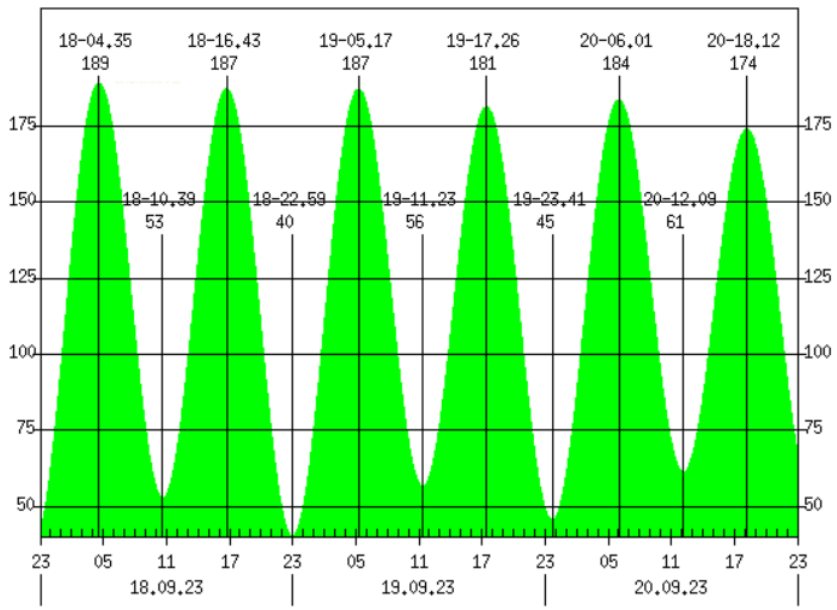


Рисунок Б.4. График хода уровня моря и негармонические постоянные в пункте «Кемь», полученные из портала ЕСИМО, за 18-20 сентября 2023 г. [36]