



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

«ВЛИЯНИЕ ТЕЧЕНИЙ НА ЧИСЛЕННОСТЬ МИДИЙ»

Исполнитель: Архипова Яна Вячеславовна

Научный руководитель: к.г.н., доцент Чанцев Валерий Юрьевич

Научный консультант: _____

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

г. Санкт-Петербург
2022 г.

Оглавление	
Введение.....	2
Глава 1. Описание условий обитания беломорской мидии.....	4
1.1. Батиметрические особенности.....	5
1.2. Гидрометеорологические характеристики.....	7
1.3. Горизонтальная циркуляция.....	11
1.4. Описание мидийных популяций в Белом море.....	14
Глава 2. Биология беломорской мидии.....	18
2.1. Жизненный цикл мидий.....	18
2.2. Размножение и нерест.....	21
2.3. Факторы невыживаемости мидий.....	23
Глава 3. Моделирование распространения спата мидий.....	25
3.1. Исходные данные.....	25
3.2. Описание численной модели.....	29
3.3. Численный эксперимент.....	35
Заключение.....	45
Список использованной литературы.....	46

Введение

В настоящее время на фоне увеличения стоимости промышленного рыболовства и сокращения объемов продовольственных ресурсов Мирового океана, а также популяризации идеи перехода к экономичному и осознанному использованию природных ресурсов все большую популярность обретает воспроизводство морских гидробионтов в искусственных условиях, то есть марикультура. Наиболее простой и доступной отраслью марикультуры является конхиокультура – выращивание моллюсков, в том числе мидий. Мидии имеют в этом случае ряд преимуществ: они считаются неприхотливыми к условиям внешней среды; взрослые особи не имеют способности перемещаться, что сокращает площадь хозяйства; посадочный материал (личинки) самостоятельно поступает на акваторию фермы с помощью течений. Отсюда возникает возможный путь оптимизации процесса искусственного выращивания мидий – отследить, каким образом влияют течения на распространение спата мидий.

Цель данной работы – рассмотреть на основе численной модели возможные пути распространения спата вместе с течениями от традиционных мест обитания. Наиболее подходящий для этого регион – акватория Белого моря, так как оно относительно мелководное и его гидрологические условия благоприятны для существования мидии обыкновенной; также на его территории ведутся активные исследовательские работы о жизненном цикле упомянутой выше мидии, что позволит собрать как можно больше исходной информации и повысит точность и качество экспериментов.

В задачи работы входят:

- изучение физико-географических особенностей и протекания основных гидрологических процессов Белого моря;
- изучение закономерностей жизненного цикла беломорской мидии и факторов, влияющих на ее существование;

- доработка существующей численной модели распространения примесей и развитие ее до возможности использования в моделировании распространения спата мидий;
- анализ влияния скорости и направления течений на распространение спата от традиционных мест обитания на основе численного моделирования и результатов проделанных экспериментов.

Глава 1. Описание условий обитания беломорской мидии

Белое море располагается на севере европейской части территории России и является окраинным шельфовым морем, входящим в бассейн Северного Ледовитого океана. Море занимает 90 тыс. км² площади; объем его вод – 6 тыс. км³; средняя глубина составляет 67 м, а наибольшая – 350 м (в южной части). Границы его простираются от 63°48' до 68°40' северной широты и от 32°00' до 44°30' восточной долготы. Акватория врезанного в континент Белого моря имеет сухопутные границы на западе, юге и востоке, и лишь на севере его разделяют с Баренцевым морем условные водные границы. Море уникально по своему строению, обычно его делят на 3 района: северный, средний и южный. Северный район имеет название Воронка, получивший его от своей причудливой формы. На севере Воронки воды Белого моря встречаются с водами Баренцева моря по линии от мыса Святой Нос до мыса Канин Нос, южные границы района доходят до устья реки Мезень, включая в себя Мезенскую губу. Южная, или центральная, более обширная и глубоководная часть носит название Бассейна и включает в себя Двинский, Онежский и Кандалакшский заливы. Северная и южная части моря соединяются узким проливом – Горлом, границы которого проходят по линии от мыса Данилов до мыса Воронов сверху и от мыса Никодимский до мыса Веперовский снизу [1, 2, 3].

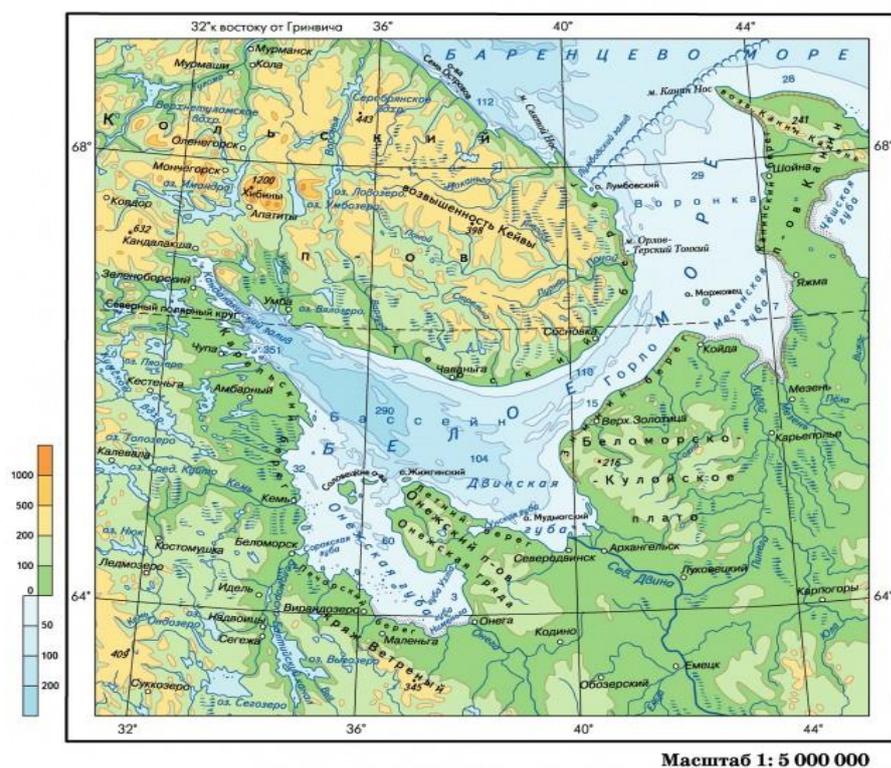


Рис. 1.1. Географическая карта Белого моря [4].

1.1. Батиметрические особенности

Так как тема исследования ориентирована на жизненный цикл мидий и влияние на него течений, выявление особенностей строения дна Белого моря является важной частью моей работы.

Рельеф дна Белого моря разнообразен и неровен, со значительными перепадами глубин в разных его частях, что хорошо видно на рисунке 1.2. Северная часть моря представляет собой наиболее мелководную часть, со средними изобатами не превышающими 20 м в Мезенском заливе и глубинами 60 – 70 м, а иногда и 100 м, на севере Воронки. Дело в том, что русло реки Мезень образует ложбинообразное понижение в Мезенском заливе, на входе в который находится множество песчаных банок, называемых «Северными кошками». Их размеры и глубины над ними не стационарны из-за влияния приливных течений и штормов.

Средние глубины Горла составляют 30 – 50 м. Рельеф дна в этой части моря сильно изрезан: вдоль западного берега пролива располагается подводный желоб с глубинами более 50 м; по всему дну Горла распространяются замкнутые котловины и чередующиеся гряды, желоба и обособленные поднятия. Именно мелководный пролив в средней части Белого моря затрудняет его водообмен с Баренцевым морем, создавая условия для формирования особенного режима первого.

Частью с наиболее разнообразным и глубоким рельефом является Бассейн. Здесь находится самая глубокая часть моря – Кандалакшский залив, представляющий собой желоб, в котором имеются три разделенных порогами котловины, со средними глубинами более 100 м и наибольшей глубиной в 343 м в районе мыса Турьего. Юго-восточная часть желоба образует Двинский залив. В северной части впадины неровное дно образует Кандалакшские шхеры. Интересным местом представляется Онежский залив: самый мелководный залив с глубинами от 5 до 25 м, отделенный от акватории Соловецкими островами. Дно залива состоит из многочисленных мелей и банок, в акватории залива расположено множество островов, особенно в западной его части [1, 2, 3, 5].

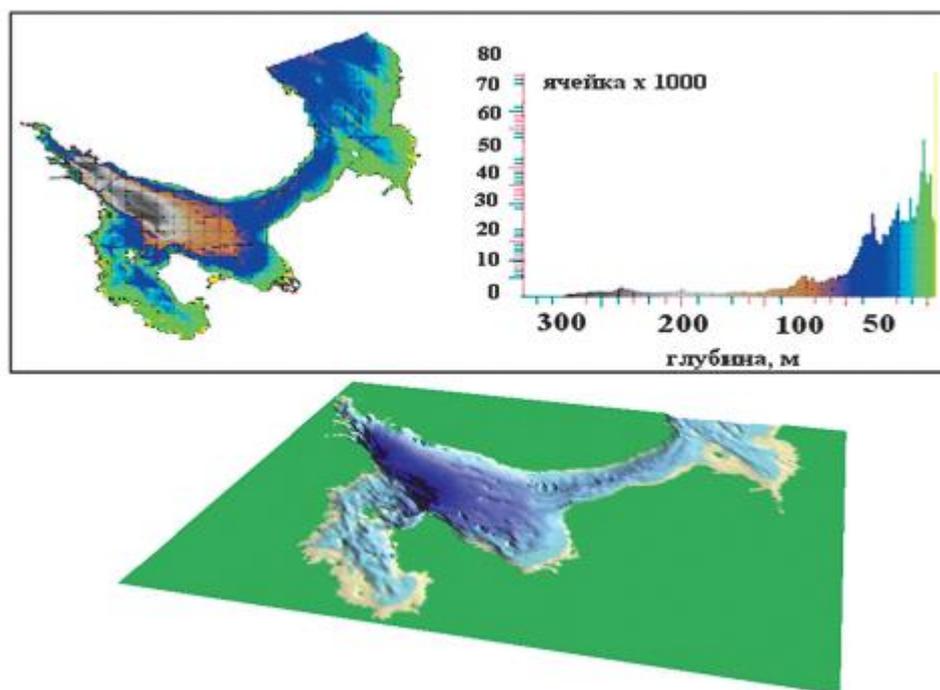


Рис. 1.2. Батиметрия Белого моря на основе цифровой модели TRANSAS/NIERSC, глубинная гистограмма и 3D модель (построена на основе: Kaitala et al., 2002) [5].

1.2. Гидрометеорологические характеристики

Так как Белое море находится у Полярного круга и связано с бассейнами Северного Ледовитого и Атлантического океанов, его климат довольно суровый. Большое влияние на климат моря оказывают воздушные массы, поступающие с Атлантики, которые обуславливают продолжительную, но теплую, зиму и короткое, прохладное лето; а также высокую влажность воздуха, большое количество осадков и быстро сменяющиеся погодные условия. В феврале температура воздуха почти над всем морем равна $-14 - 15$ $^{\circ}\text{C}$, кроме его северной части: здесь за счет влияния Атлантики температура повышается до -9 $^{\circ}\text{C}$. В июле в среднем температура равна $8 - 10$ $^{\circ}\text{C}$, проходящие циклоны вызывают повышение температуры воздуха до 12 $^{\circ}\text{C}$, а проходящие антициклоны – до $17 - 19$ $^{\circ}\text{C}$, в редких случаях над южной частью моря температура может прогреваться и до 30 $^{\circ}\text{C}$. Ежегодно над Белым морем

выпадает большое количество осадков, причем над северной его частью в 2 раза меньше (250-300 мм/год), чем над южной (400-500 мм/год). Над морем преобладает сезонная смена ветров из-за его расположения на окраине материка: с ноября по март господствуют юго-западные ветры, а с мая по сентябрь – северо-восточные. В холодное время года ветры часто вызывают шторма, причем на севере повторяемость штормов достигает 10-12 %, а к югу вероятность их появления снижается.

В среднем с ноября по март море покрыто льдом. В октябре начинается ледообразование в районе устья Мезени. Льды Белого моря не сплошные, а постоянно дрейфующие. В среднем толщина здешнего плавучего льда 35-40 см, но в холодные годы она может увеличиваться до 135 – 150 см. Припай распространяется на небольшие площади, шириной не более 1 км. В марте раньше всего лед исчезает в Воронке. Почти вся масса льдов не тает в Белом море, а выносятся ветрами и течениями в Баренцево море.

Несмотря на относительную буйность Белого моря, небольшие размеры и покров льда в сезон штормов являются факторами, обуславливающими нехватку длины разгона для волнения и вследствие - его низкую интенсивность. В северной части моря волны могут достигать 7 м, уменьшая свою интенсивность к югу.

Температура и соленость воды – крайне важные параметры для жизнедеятельности мидий, поэтому их стоит рассмотреть подробно. Температура воды на поверхности и в толще воды в Белом море отличается сильной сезонной изменчивостью и разнообразием значений в его частях.

Зимой из-за разной солености температура поверхности моря в заливах равна $-0,5 - 0,7 \text{ C}^\circ$, в Горле и Воронке она опускается до $-1,9 \text{ C}^\circ$, а в Бассейне – до $-1,3 \text{ C}^\circ$.

После стаивания льдов весной вода быстро прогревается, и к лету больше всего прогреваются воды в районе мелководных заливов. К августу поверхностные воды Кандалакшского залива прогреваются в среднем до 15 C° , воды Бассейна

– до 13 С°. Меньше всего прогреваются поверхностные воды Горла и Воронки – до 8 С°, из-за сильного перемешивания в этих частях моря (рис. 1.3).

Зимой температура, близкая к поверхностной, распространяется до глубин 30-45 м, далее она повышается до глубин 75-100 м, обозначая таким образом теплый промежуточный слой. До горизонтов 130-140 м температура вновь понижается, и далее остается неизменной и равной -1,4 С°. Весной прогрев воды распространяется до 20 м в глубину, далее температура резко понижается до 50-60 м, достигая отрицательных значений. Толщина прогретого слоя летом – около 30-40 м, затем температура понижается до -1,4 С° на горизонтах 130-140 м. К осени температура в слое 15-20 м охлаждается и выравнивается, а температура нижележащего слоя до глубин 90-100 м выше из-за остаточного летнего тепла. Начиная с глубины 130 м и до самого дна температура равняется -1,4 С°.

Стоит сказать о районных особенностях распределения температуры. В Белом море существуют так называемые «полюса холода и тепла». «Холодный полюс» расположен на выходе из Двинского залива, где на глубинах 12-15 м наблюдается нулевая температуры воды, значение которой обусловлено поднятием глубинных вод вследствие циклонической циркуляции поверхностных вод, что ярче просматривается в летний период. «Полюс тепла» - противоположное явление, которое наблюдается на выходе из Кандалакшского залива осенью. Здесь теплые воды опускаются глубже средних относительно всего моря горизонтов, на глубине 65 м наблюдается нулевая температура, обусловленная адвекцией тепла – притока более теплых глубинных вод Горла. Вследствие хорошего перемешивания и малых глубин температура воды в Горле однородна, температура изменяется во всей массе воды, а не по слоям [2, 3, 5, 7].

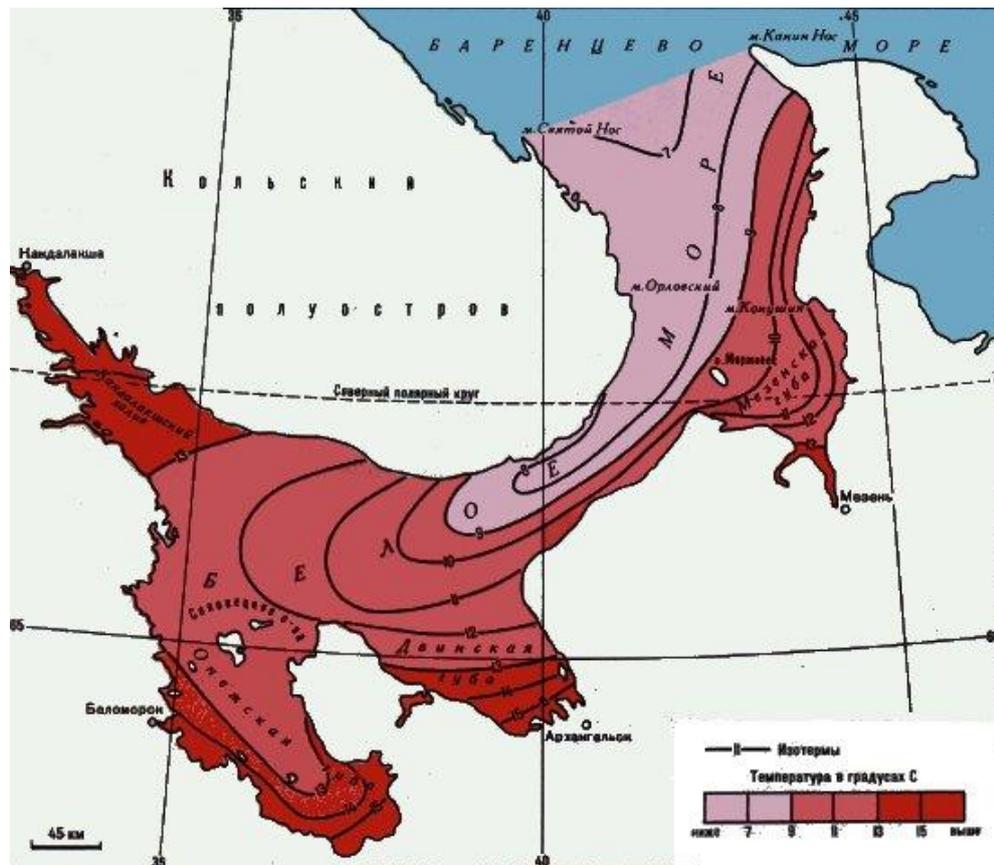


Рис. 1.3. Карта распределения многолетней средней температуры воды на поверхности Белого моря летом [6].

Соленость Белого моря ниже средней солености океана, вследствие опреснения, которое дают сток вод Северной Двины, перенос вод течениями и поступающие воды Баренцева моря.

Зимой на поверхности соленость выше, чем обычно. В Бассейне она составляет 28 ‰, причем такая величина солености просматривается до глубин 30-40 м. в Воронке и Горле соленость равна 23-30 ‰. Устьевые районы рек сильно опреснены и имеют меньшую соленость.

Поверхностные воды весной сильно опресняются на востоке моря, имея значения до 23 ‰ (10 - 12 ‰ в Двинском заливе), и слабее на западе – до 26 ‰. Такие солености наблюдаются в слое 5-10 м, после чего происходит их резкое увеличение до горизонтов 30 м и затем плавное повышение ко дну.

Летом соленость понижена на поверхности (рис. 1.4). В Бассейне и заливах толщина слоев с пониженной соленостью отличается друг от друга, вследствие чего у Белого моря появляется гидрологическая особенность: центральная часть Бассейна выступает в роле своеобразного накопителя распресненных вод, которые поступают из Двинского и Кандалакшского заливов.

Осенью соленость увеличивается из-за сокращения речного стока и начала ледообразования. В районах Горла, Онежского и Мезенского заливов наблюдается однообразное распределение солености в течение года [2, 3, 5, 7].

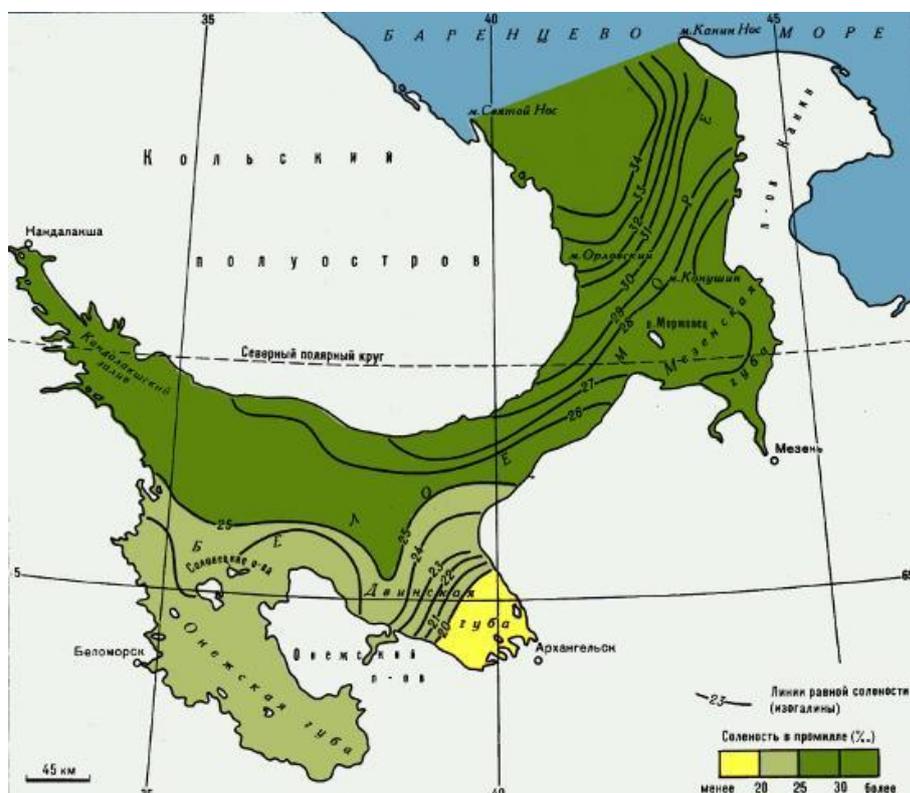


Рис. 1.4. Карта распределения многолетней средней солености воды на поверхности Белого моря летом [6].

1.3. Горизонтальная циркуляция

В Белом море течения порождаются под воздействием речного стока, приливов, ветра и компенсационных потоков. Результирующее движение

течений направлено против часовой стрелки, что соответствует горизонтальной циркуляции вод Северного полушария.

К постоянным поверхностным течениям относятся:

- Беломорское течение со средней скоростью 30 см/с, которое начинается у мыса Зимнегорский и идет по направлению в Баренцево море;

- Двинское течение со скоростью 10-15 см/с, идет вдоль Зимнего берега (восточный берег Двинского залива) в Горло;

- Онежское течение со скоростью 10-20 см/с, выходящее через Восточную Соловецкую Салму (Соловецкие острова) по направлению в Двинский залив вдоль Летнего берега (западный берег Двинского залива);

- Кандалакшское течение со скоростью 5-10 см/с, которое вытекает из одноименного залива по направлению в Онежский залив;

- Баренцевоморское течение со скоростью 5-10 см/с, которое прослеживается только в северо-западной части Воронки.

Течения под влиянием силы Кориолиса прижимаются к правому берегу. На границах Бассейна и заливов образуются слабые циклонические круговороты, обусловленные противоположным движением вод в этих районах. В свою очередь эти круговороты создают антициклоническое движение вод между ними. Вокруг Соловецких островов наблюдается движение вод по часовой стрелке. Распределение течений представлено на рисунке 1.5.

Также в море существуют ветровые и приливные течения, причем скорости последних намного превышают скорости постоянных. В юго-западной части Двинского залива и восточной части Кандалакшского приливы носят неправильный полусуточный характер, на остальной акватории - правильные полусуточные приливы. На границе Воронки и Мезенского залива приливные течения достигают наибольших скоростей – 200-300 см/с; в Горле у Терского берега – 100 см/с; в Соловецких Салмах и Онежском заливе – 80-100 см/с. Приливные течения в Бассейне примерно равны постоянным по скорости. Скорости ветровых течений небольшие: при северо-западном ветре они равны

около 15-18 см/с (в Онежском и Кандалакшском заливах), при юго-западном ветре – 14-16 см/с (в Двинском заливе и у Канинского берега).

Приливы в море выражены хорошо, наибольшая их величина, равная 7 м, просматривается в Мезенском заливе; у Воронки, Канинского берега и острова Сосновец в Кандалакшском заливе величина приливов составляет около 3 м. В Двинском, Онежском заливах и в центре Бассейна приливы меньше [3, 8, 9].

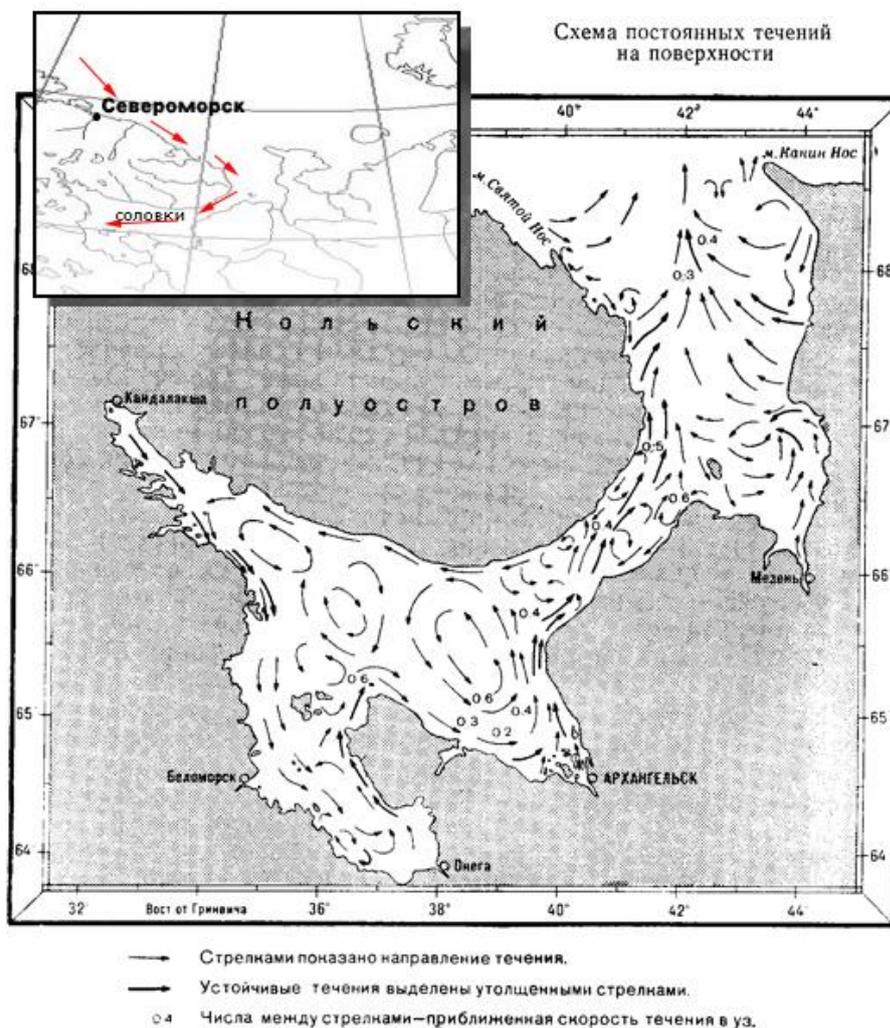


Рис. 1.5. Карта распределения постоянных поверхностных течений Белого моря [8].

1.4. Описание мидийных популяций в Белом море

В видовом составе бентоса Белого моря мидии занимают важное место: обосновавшись на обширных участках с высокой плотностью поселения, они создают пояс фильтраторов моря; мидиевые банки играют существенную роль в процессах детритообразования и осадконакопления. Из-за своей эврибионтности мидии поселяются на разнообразных участках моря вблизи уреза воды, где происходят сезонные и суточные колебания факторов внешней среды [11].

Исследуемый вид мидий *Mytilus edulis* в Белом море обитает практически везде в пределах глубин до 70 м. Самые многочисленные скопления находятся на мелководье на глубинах до 1 м с интенсивными приливно-отливными течениями, где их численность может достигать несколько десятков тысяч экз/м².

На данный момент большое количество исследований скоплений мидий проходили в основном в губах и бухтах Кандалакшского залива, в Онежском заливе и совсем немного – в Двинском заливе. Карта распределения популяций (рис. 1.6) построена на основании информации о исследуемых мидийных поселениях в Белом море из доступных источников [11,14-20].

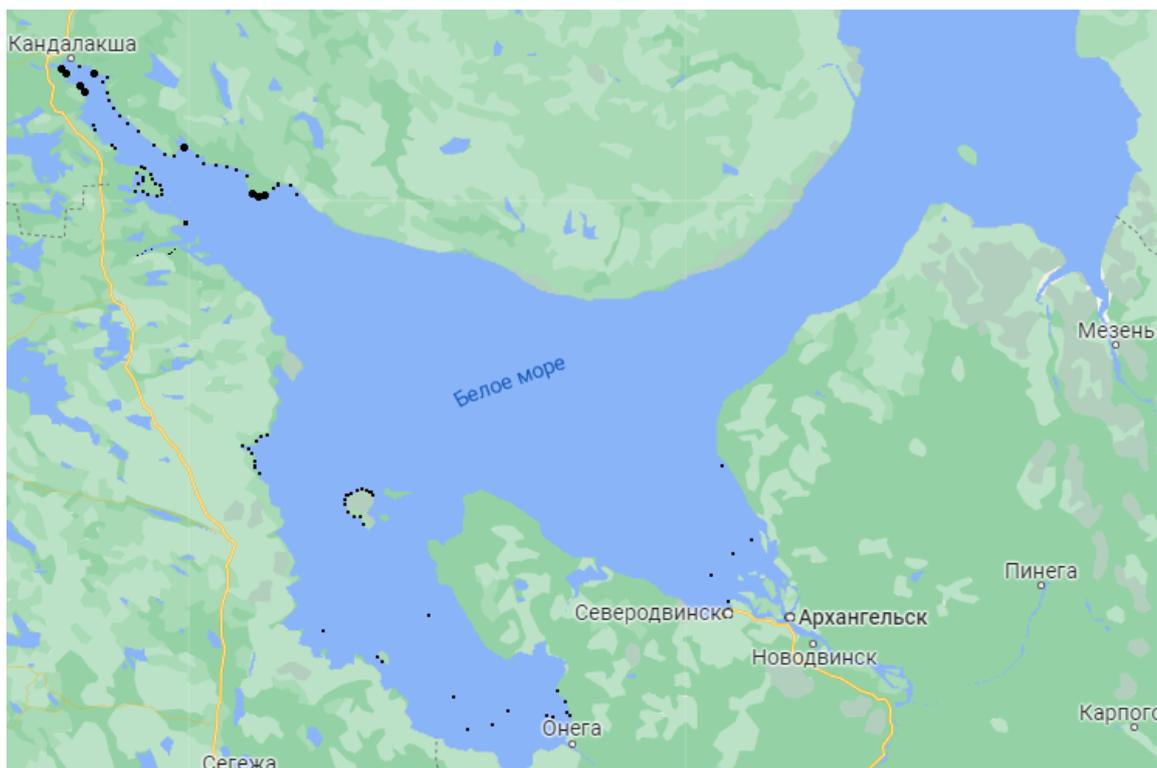


Рис. 1.6. Карта возможного распределения популяций *Mytilus edulis* в Белом море.

Как показали исследования студентов СПбГУ (1987- 1990 г.) [10] на примере губы Чупа Кандалакшского залива максимальное количество мидий сосредоточено на литорали и в верхней сублиторали до глубины 0,5 м на каменистом дне, меньшее количество мидий было обнаружено на мягких грунтах. Увеличение численности происходило от среднего горизонта литорали к верхнему горизонту сублиторали. Также известно, что спад оседает в верхней сублиторали, что увеличивает численность популяции за счет молодых особей.

Трудом нескольких ученых [21] было доказано, что в Белом море также обитает вид мидий *Mytilus trossulus* родом из Канады или США, которых обнаружили в водах Кандалакшского залива только в 2009 году. Предположительно, их заселение произошло до 1980-ых годов во время прихода кораблей в порт Умба (Мурманская область). Также определено, что в редких случаях два вида *trossulus* и *edulis* скрещиваются.

В общем в Белом море насчитывается около $4 \cdot 10^{12}$ особей обыкновенной мидии, с биомассой в 2 млн т. Мидии предпочитают обосновываться на каменистых участках дна; в литоральной зоне они обитают в биоценозе бурых водорослей, а в сублиторали – на глубинах до 5 метров; также мидиевые банки встречаются на илах и песках, где они скрепляются между собой и погружаются в грунт, в устьях рек и ручьев на глубинах до 15 м. Существует 4 типа развития мидийных поселений, причем 2 из них встречается чаще на литорали, а другие 2 – на сублиторали.

На прибойной скалистой литорали и на берегу, заросшем нитчатými водорослями, цикл жизни мидий самый простой и быстрый, за счет ежегодного уничтожения популяции на скалах плавающими льдами и гибели водорослей на пляже. Мидии не только не успевают размножиться за 3-6 месяцев, но и не достигают половозрелости, поэтому такие популяции называют «призраками». Несмотря на гибель, ежегодно такие популяции возникают вновь.

На жестких грунтах поселения могут существовать долго, при этом достигая половозрелости и размножаясь. Такую популяцию называют «вечно юной», т. к. взрослые особи не выдерживают весеннего опреснения и популяция постоянно обновляется.

В местах со слабыми придонными течениями на сублиторали во время отлива дно никогда не обнажается, что создает благоприятные условия для обитания и выживания. Здесь со временем образуются плотные поселения взрослых мидий, которые выделяют репелленты – вещества, не позволяющие молодым заселяться на банку. Такая популяция живет до тех пор, пока мидии не умрут естественной смертью - от старости.

На сублиторали в местах с высокими скоростями придонных течений продолжительность популяции с широким возрастным диапазоном составляет от 6 до 12 лет. Сильные течения размывают ил, образованный умершими особями, и репелленты, что дает возможность для заселения банки молодью.

Стоит сказать, что в Белом море у обыкновенной мидии есть враг – морская звезда *Asterias rubens*, которая образует поселения вдоль нижнего края

банки и поедает выбившихся моллюсков. Также в роли лимитирующего фактора выступает скорость течения, с уменьшением которой замедляется рост моллюсков, и продолжительность осушения, увеличение которого также способствуют замедлению роста мидии из-за ограниченного доступа к пище [10, 14, 22].

Глава 2. Биология беломорской мидии

Объектом исследования в данной работе является мидия съедобная, ареал обитания которой распространяется практически повсеместно в северном полушарии. Такой, казалось бы, незамысловатый вид представляет собой большой интерес не только для науки, но и для экономики, экологии и других отраслей. Мидия на сегодняшний день занимает важное место в производстве аквакультуры, а ее фильтрационные способности играют важную роль в процессах самоочищения водоемов.

2.1. Жизненный цикл мидий

Мидии ведут прикрепленный образ жизни, создавая большие скопления в прибрежной зоне на твердых субстратах – камнях, волнорезах, скалах, или же прикрепляясь к нитчатым водорослям в местах с песчаным или илистым грунтом. Они нуждаются в соленой морской воде, для жизни им необходимо и наличие течений. Питаются мидии мелким планктоном и бактериями, одноклеточными водорослями, останками растений с помощью фильтрации. Им подходят глубины от 0,5 до 200 м, но с увеличением глубины уменьшается их биомасса. Подходящая соленость воды – от 17 до 34 ‰, в условиях пресной воды мидия съедобная может прожить до 2 недель. Для роста моллюсков на первом году жизни важна освещенность: в темноте скорость их роста снижается. Диапазон температуры, в котором мидия может существовать, составляет от -2 до 30 С°. В сутки моллюск размером 3-6 см может отфильтровать 60-70 л воды. Оптимальный кислородный режим – от 3 до 6 мг/л, причем максимальное потребление кислорода приходится на период размножения.

Мидии относятся к классу двустворчатых моллюсков с раковиной, образованной двумя клиновидными створками с гладкой поверхностью. Створки соединяются с помощью лигамента двумя мускулами-замыкателями. Мантия покрывает тело моллюска, образуя мантийную полость. Мантийные

лопасти срастаются вдоль спинной стороны моллюска, а их свободные края связаны сзади поперечным парусом. Между парусом и лопастями находится выводной сифон, представляющий собой верхнее выводное отверстие. Вода попадает в мантийную полость под жаберным парусом между свободными краями мантии, образующими бахромчатые выросты. С брюшной стороны тела расположена нога, утратившая свои двигательные функции. У основания ноги расположена биссусная железа, которая выделяет биссус – тонкие нити, служащие моллюску как своеобразный «клей», с помощью которого мидия прикрепляется к субстрату.

Пищеварительная система моллюска состоит из рта, ведущего в пищевод, который переходит в желудок. На брюшной стороне желудка расположен слепой карман, в котором находится растворяющийся и выделяющий пищевой фермент стержень. Жабры у мидии находятся в мантийной полости по бокам тела. Они состоят из жаберной оси, прикрепленной к телу, и отходящих от нее двух рядов жаберных нитей. Последние в свою очередь сцепляются жесткими ресничками. Ток воды в мантийную полость происходит благодаря мерцательному эпителию, которым покрыты жабры.

В кровеносную незамкнутую систему моллюска входит сердце, сеть артериальных сосудов и система венозных каналов, лакуны и синусы. Кровь мидии не имеет цвета. Сердце находится на спинной стороне в околосоердечной сумке, оно пронизано задней кишкой.

Две почки, расположенные по бокам тела у жабр, соединяются с околосоердечной сумкой с одной стороны и мантийной полостью с другой, образуя выделительную систему мидии.

Нервная система мидии состоит из головных, ножных и внутренностных узлов. Органы чувств у них развиты слабо.

Гонады (половые железы) – парные, состоят из трубочек, лопастей и долек, которые находятся в брюшном отделе туловища и в мантийных складках. С помощью половых отверстий выводные протоки открываются в мантийную полость [27, 33].

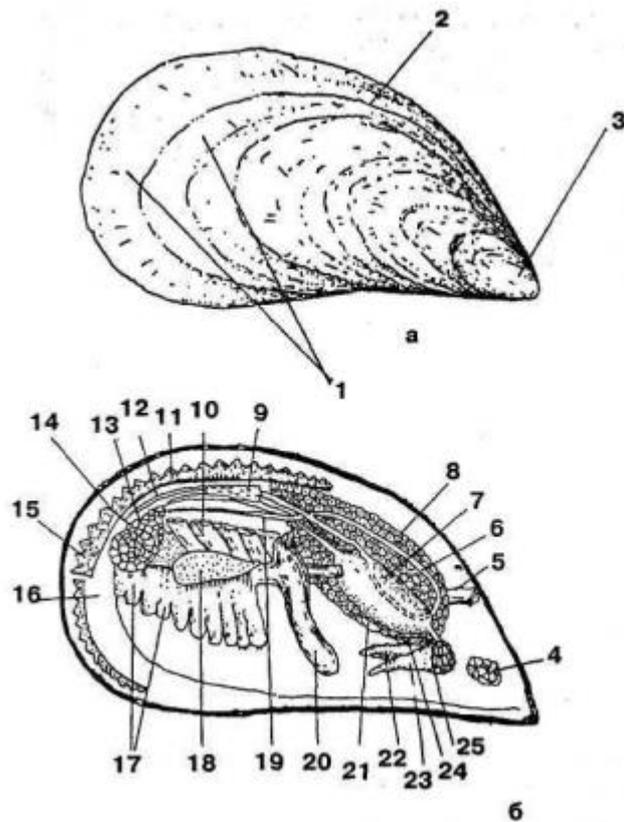


Рис. 2.1. Строение мидии:

а – правая створка раковины; б- мидия вскрытая с правой стороны: 1 – зоны роста; 2 – линии нарастания; 3 – макушка; 4 – передний мускул замыкатель; 5 – передний мускул-втягиватель ноги; 6 – передняя петля кишки; 7 – желудок; 8 – печень; 9 -околосердечная сумка; 10 - мускулы-втягиватели ноги; 11 – линия разреза через правую мантийную складку; 12 – задняя кишка; 13 – задний мускул-замыкатель; 14 – заднепроходное отверстие; 15 – неудаленная часть правой мантийной складки; 16 – левая мантийная складка; 17 – левая жабра; 18 – брюшной (нижний) отдел туловища; 19 – задняя петля кишки; 20 – нога; 21 – слепой карман желудка; 22 – внутренняя ротовая лопасть правой стороны; 23 – наружная ротовая лопасть; 24 – кристаллический стебелек; 25 – пищевод [27].

2.2. Размножение и нерест

Мидии – раздельнополые организмы, но среди них могут встречаться гермафродиты. Обычное для них соотношение полов – 1:1. Пол моллюска можно отличить по цвету гонад во время полового созревания: самки – оранжево-красного цвета, а самцы – кремового, но этот способ не слишком надежен.

Время достижения половозрелости, время нереста, скорость развития и место оседания личинки у мидий зависит от ряда факторов: температура, питание, интенсивность течений, наличие субстрата.

Достижение половозрелости у мидий происходит на первом-третьем году жизни, в зависимости от условий и места обитания. Развитие мидий может замедлять пониженная температура в районе их обитания. Конкретно в Белом море, во время его замерзания, рост мидий подо льдом значительно снижает скорость. Если мидиевая банка находится на литорали в приливо-отливной зоне, то на ее развитие влияют периоды осушения.

Инициирование вымета у мидий в Белом море происходит под влиянием потепления воды до 10-12 С°, а также при сильном опреснении или при шторме. Есть исследования, где изменения лунных фаз тоже представляется природным инициатором [29].

Репродуктивный цикл мидий состоит из нескольких стадий: преднерестовой, нерест, посленерестовой, роста, созревания. Время наступления и продолжительность каждой из стадий обуславливает температурный режим места обитания. Нерест беломорских мидий происходит с июня по август в разных районах. За один нерестовый период самка выметывает миллионы зрелых яйцеклеток.

Существует также несколько стадий развития мидии (рис. 2.2), на каждой из которых у будущей мидии образуются новые органы:

- 1) Трохофора. Стадия длится до 72 часов, появляется тонкая пленка раковины.

- 2) Велигер (парусник). Тело личинки сплющивается и образует плавательный орган – парус, появляется мускулатура, пищеварительная система. Стадия длится от 14 до 25 суток.
- 3) Великонха. Происходит образование мягких частей тела, длина личинки увеличивается до 250-350 мкм.
- 4) Педивелигер. Длина ноги увеличивается перед оседанием на субстрат. Период продолжается около недели, в это время моллюск наиболее подвижен. Педивелигер прикрепляется к субстрату биссусными нитями, если же личинка попала в неблагоприятные условия, то она открепляется и ищет подходящий субстрат еще какое-то время.
- 5) Спат. После 1,5-2 месяцев с начала развития личинка окончательно оседает на субстрат и утрачивает парус, который заменяется ногой. Начинается рост заднего края раковины, ее цвет становится более темным. Мидия переходит ко взрослому образу жизни [27].



Рис. 2.2. Схема жизненного цикла мидии [32].

Пространственное распределение личинок мидий зависит от гидрологических условий и качества субстрата, а также от положения родительских популяций относительно направления течений. Личинки передвигаются в основном по ходу течений в толще воды над районами

родительских популяций или недалеко от них. Наибольшую плотность личинок в кутовой части заливов можно объяснить влиянием циркуляционных течений и рельефа дна.

Рост мидий связан с фильтрацией, которая обуславливает питание и дыхание.

Достижение максимальных размеров мидий в Белом море происходит за 12-15 лет, при продолжительности жизни до 30 лет [23, 24, 25, 26,27,28,30,31].

2.3. Факторы невыживаемости мидий

Исследовав моллюска в каком-либо определенном месте, можно получить четкое представление о состоянии и показателях среды этого участка моря, т.к. жабры двустворчатых больше всего подвержены влиянию загрязнителей и других факторов. В Белом море моллюски постоянно подвергаются антропогенному воздействию за счет речного стока, в состав которого входят бытовые сточные воды, отходов лесопиления (г. Кандалакша), агрохимии (о. Ряшко у порта Умба), а также нефтяного загрязнения от нефтебазы станции Белое море (о. Олений), поступающего с порта г. Кандалакша загрязнения Са и Р из апатитовых концентратов. Мидии, поселяясь в зонах с изменчивыми условиями, смогли выработать множество биохимических, поведенческих и физиологических адаптаций. Одна из таких адаптаций – замедление метаболизма и переход на аэробный режим выработки энергии во время наиболее активных фаз загрязнений. Но мидии не могут приспособиться ко всему. Например доказано, что резкая смена температуры для сублиторальных видов, которые живут в условиях относительно постоянной температуры, с большой вероятностью приведет к гибели, т.к. для мидии это будет большим стрессом. Акватории Белого моря примыкающие к территории Карелии, Архангельской и Мурманской областей испытывают на себе максимальный ущерб от антропогенного воздействия, т.к. большинство стоков находится именно здесь. Кутовый участок акватории Кандалакшского

залива является наиболее загрязненным, т.к. подвержен воздействию производственных и ливневых, хозяйственно-бытовых стоков и загрязнений, поступающих из бассейна реки Нива. Одна из серьезных проблем здешних мест – массивованные холостые сбросы с ГЭС на крупных реках, вызывающие резкое опреснение воды и влекущие за собой массовую гибель биоты [14, 15, 17, 34, 35, 36].

Глава 3. Моделирование распространения спата мидий

3.1. Исходные данные

Чтобы промоделировать распространение спата мидий нужно иметь следующий набор данных:

Течения

Спат мидий распространяется с помощью переноса течениями. Физические основы распространения течений в Белом море разобраны в 1 главе. В качестве исходных данных для модели была взята выборка с ежедневными значениями направления и скорости течений по U и V составляющим за период с 1 января по 31 декабря 2019 года с портала данных морского подразделения европейского научного сообщества Copernicus [37]. Выбранная база данных – Global Ocean Physics Reanalysis (идентификатор продукта – GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030). Это численная модель с пространственным разрешением $0,083^\circ \times 0,083^\circ$ и системой отсчета координат WGS 84 (EPSG 4326), которая основана на системе глобального прогнозирования CMEMS. Данные были получены в формате .nc в едином файле, содержащем суточные значения за год, и далее преобразованы и разделены на отдельные файлы по дням в формате .dat с помощью написанного кода на языке Python для удобного использования в моделировании.

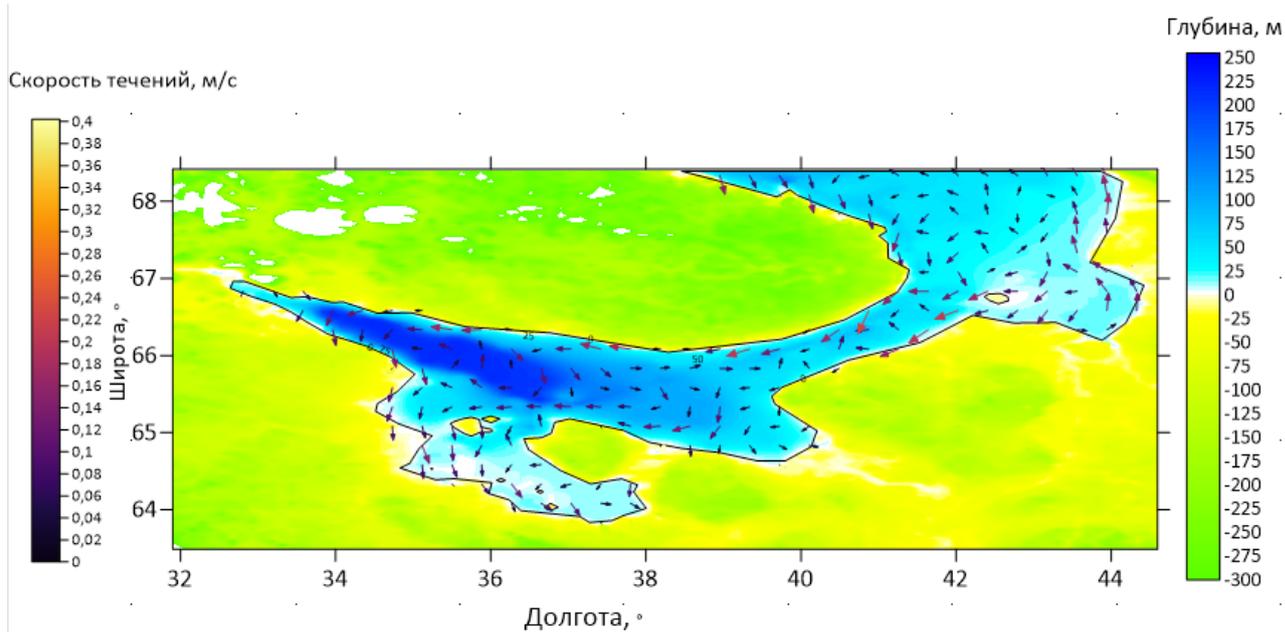


Рис. 3.1. Пример распределения поверхностных течений на 5 июля 2019 года.

Батиметрия

Батиметрические данные Белого моря с координатной сеткой были взяты с портала GEBCO [38]. Модель рельефа океана и суши GEBCO_2021 Grid представляет собой данные о глубине в метрах на сетке с интервалом 15 угловых секунд в формате Esri ASCII.



Рис. 3.2. Батиметрия Белого моря на основе данных с портала GEBCO [38].

Береговая линия

Координаты условной береговой линии и островов Белого моря были получены с помощью программы «Surfer». Данные береговой линии позволяют определить момент оседания/прикрепления спата.

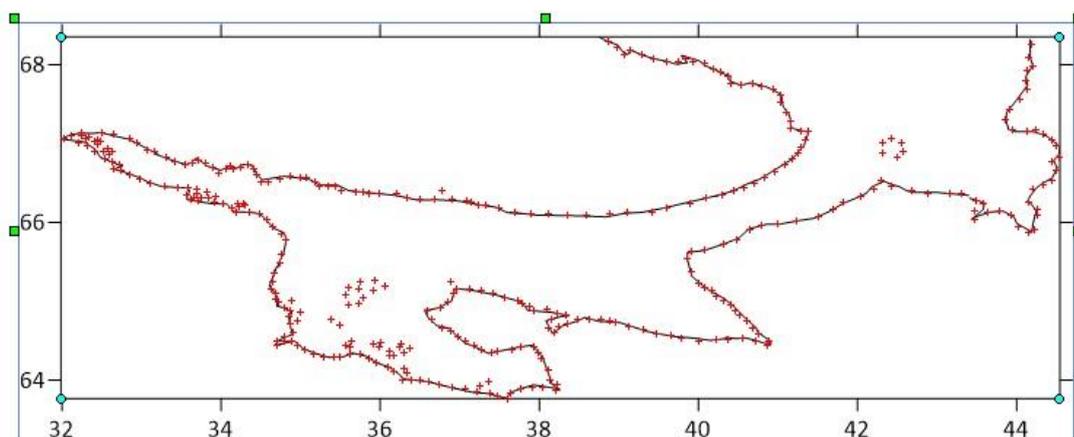


Рис. 3.3. Карта береговой линии, созданная в программе «Surfer».

Источники поступления спата (районы нереста)

Карты с координатами районов нереста были построены на основе информации, полученной из источников описанных во 2 главе, с помощью программы «Google Earth» [39]. В дальнейшем на территориях этих районов будут задаваться начальные координаты нахождения спата.

Данные о грунте

Как известно, спат мидий оседает на твердых грунтах, валунах, нитчатых водорослях и т.д. Состав и вид грунта в любой части Белого моря можно узнать с помощью литологических карт поверхности морского дна, построенных Министерством природных ресурсов и экологии РФ [40]. Данные, полученные

с карт, были использованы для определения грунта, на котором прикрепился спат.



Рис. 3.4. Карты районов нереста мидий в Белом море, построенные с помощью программы «Google Earth» [39].

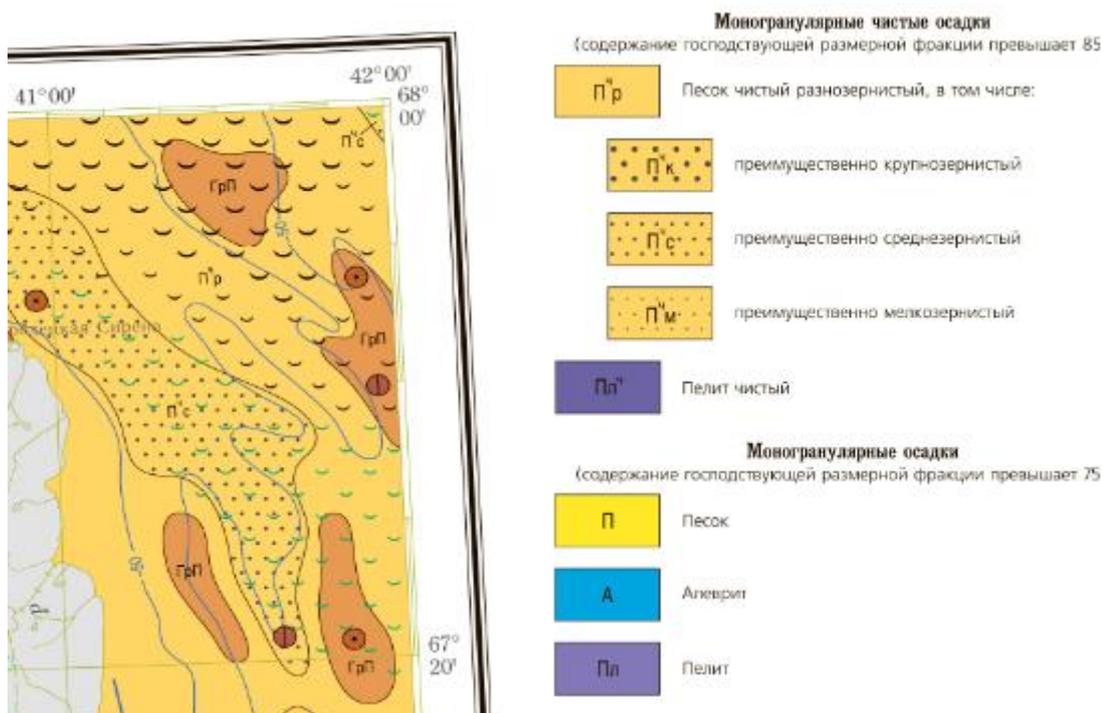


Рис. 3.5. Фрагмент литологической карты поверхности морского дна Белого моря [40].

3.2. Описание численной модели

Урожайность поколения мидий зависит от условий в период нереста, в том числе от течений, которые главным образом определяют места осадения спата. Отследить осадение спата в период нереста можно с помощью математической модели, задав определенные начальные и граничные условия.

Для данного исследования в качестве основы была использована численная модель расчета распределения икры трески, созданная Чанцевым В. Ю. [43]. В последствии модель была модифицирована посредством добавления 3-его измерения и возможностью отследить прилипание, то есть остановку перемещения спата при касании дна или береговой линии. Модель 3D расчета непрерывного распределения маркеров от распределенного источника написана на языке программирования Fortran. Основой модели является метод маркеров, который подразумевает под собой анализ закономерностей случайных блужданий частиц и вычисление вероятностей тех или иных событий [41]. Для диффузионных задач интерес представляют пропорциональные концентрациям примеси условные вероятности перехода частиц из одной точки пространства в другую в течение отрезка времени Δt . Вычисления можно провести путем статистической обработки конечных координат большого количества подсчитанных траекторий блуждающих частиц, которые образуют облако примеси.

Расчет производился в лагранжевых координатах. При численном моделировании приращение траектории частицы по оси x и y можно записать в виде:

$$x_i^{t+\Delta t} = x_i^t + \bar{U}_i * \Delta t + \eta_{xi}, \quad (3.1)$$

$$y_i^{t+\Delta t} = y_i^t + \bar{V}_i * \Delta t + \eta_{yi}, \quad (3.2)$$

$$\eta = a * \sqrt{k_{x(y;z)} * \Delta t} * \zeta(-1,1), \quad (3.3)$$

где i – номер частицы,

U, V – горизонтальные составляющие скорости течений в точках выпуска маркеров,

η – переменная, описывающая вертикальную диффузию,

ζ – случайная величина,

$k_{x,y,z}$ – коэффициент горизонтальной/вертикальной турбулентной диффузии.

Так как вертикальная скорость течений отсутствует, перемещение частицы по оси z определяет только вертикальная диффузия:

$$z_i^{t+\Delta t} = z_i^t + \eta_{zi} * \zeta(-1,1). \quad (3.4)$$

Нужно сказать о том, что распределение частиц в данном случае осуществляется главным образом адвекцией и диффузией. Член $\bar{U}_i * \Delta t$ выражает адвекцию, то есть перенос частицы течениями, член η_{yi} описывает диффузию, согласно теории статистической гидромеханики [44].

В качестве входных данных в модели используются:

- файл береговой линии Белого моря, по которому в программе проверяется пересечение с берегом и дном;
- файл батиметрии Белого моря;
- файл, содержащий границы слоев течений;
- файл, содержащий направления и скорости горизонтальных составляющих течений по слоям;
- файл с источниками спата (14400 точек в определенном районе);
- количество шагов по времени файла течений, в данном случае – 92 шага, т.к. нерест мидий длится 2-3 месяца (с июля по сентябрь);
- количество шагов по осям файла течений;

- начальные координаты сетки файла течений, переведенные в метры, для удобного использования в моделировании и просмотра расстояний, на которые перемещается спат;
- шаги сетки по X и Y для файла течений, переведенные в метры;
- начальные координаты сетки файла глубин, переведенные в метры;
- шаги сетки по X и Y для файла глубин, переведенные в метры;
- шаг по времени записи скорости течений, равный 86400 с (сутки);
- шаг по времени расчета, равный 1800 с (30 мин);
- значения коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии, $k_x = k_y = 10, k_z = 10^{-7}$.

Перевод географических координат в метрические осуществлялся по формулам:

$$x_1 = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{180} * \pi * \cos\left(\frac{\varphi_1}{180} * \pi\right) * R, \quad (3.5)$$

$$y_1 = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{180} * \pi * R, \quad (3.6)$$

$$\Delta y = \frac{\Delta y^\circ * \pi * R}{180}, \quad (3.7)$$

$$\Delta x = \frac{\Delta x^\circ * \pi}{180} * R * \cos\left(\frac{\overline{\varphi_1}}{180} * \pi\right), \quad (3.8)$$

где R – радиус Земли, равный 6371000 м,

φ_0, λ_0 – независимые координаты, от которых начинается отсчет (63° с.ш., 31,4° в.д.)

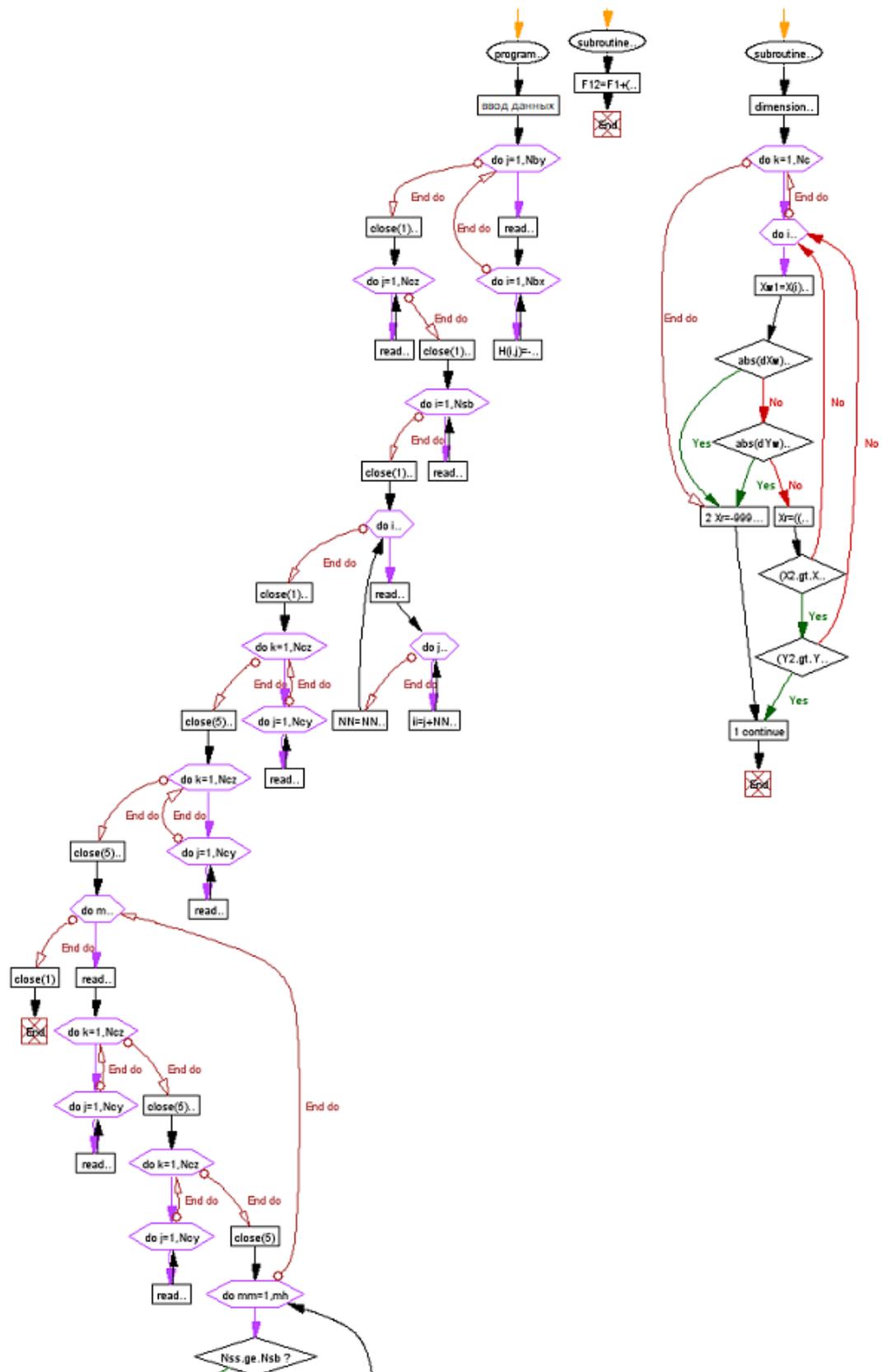
$\Delta x^\circ, \Delta y^\circ$ – шаг сетки в градусах,

$\overline{\varphi_1}$ – средняя широта Белого моря, принятая за 66° с.ш.

Суть модели заключается том, что на каждом временном шаге из определенного источника выпускается 100 маркеров (спат) и проверяется их

пересечение со дном и береговой линией. Спату присваивается цифра 1 при его прикреплении, и координаты точки записываются в отдельный итоговый файл. Если же спат не прикрепился, ему присваивается цифра 0, и его координаты записываются в отдельный файл, расчет продолжается на следующем временном шаге.

Алгоритм программы представлен на рисунке 3.6.



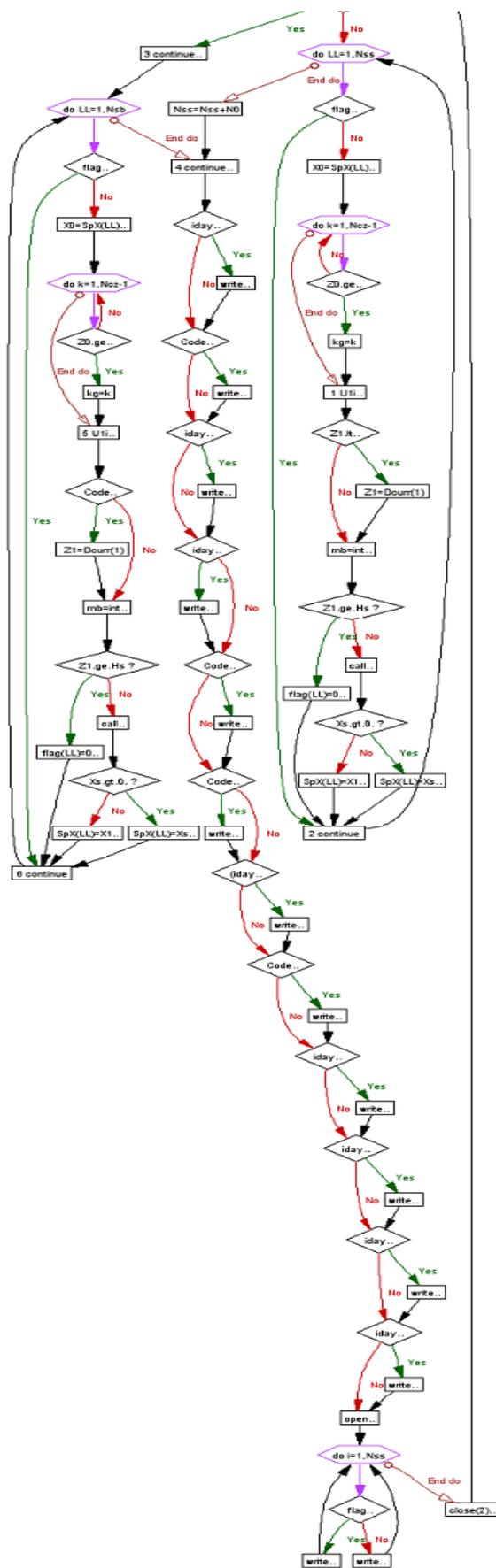


Рис. 3.6. Блок-схема используемой программы [42].

3.3. Численный эксперимент

Метод маркеров (случайных блужданий) был использован для расчета концентрации и распределения спата мидий в мелководных районах Белого моря. Расчеты проводились для периода с июля по сентябрь (время нереста мидий в Белом море) на основе данных скорости и направления течений за 2019 год. Распределение спата в модели представлено в виде концентрации маркеров за определенное время.

На основе полученной информации о местах обитания мидии съедобной в Белом море (рис. 3.4) в качестве районов нереста мидийных популяций были выбраны 3 района (рис. 3.7):

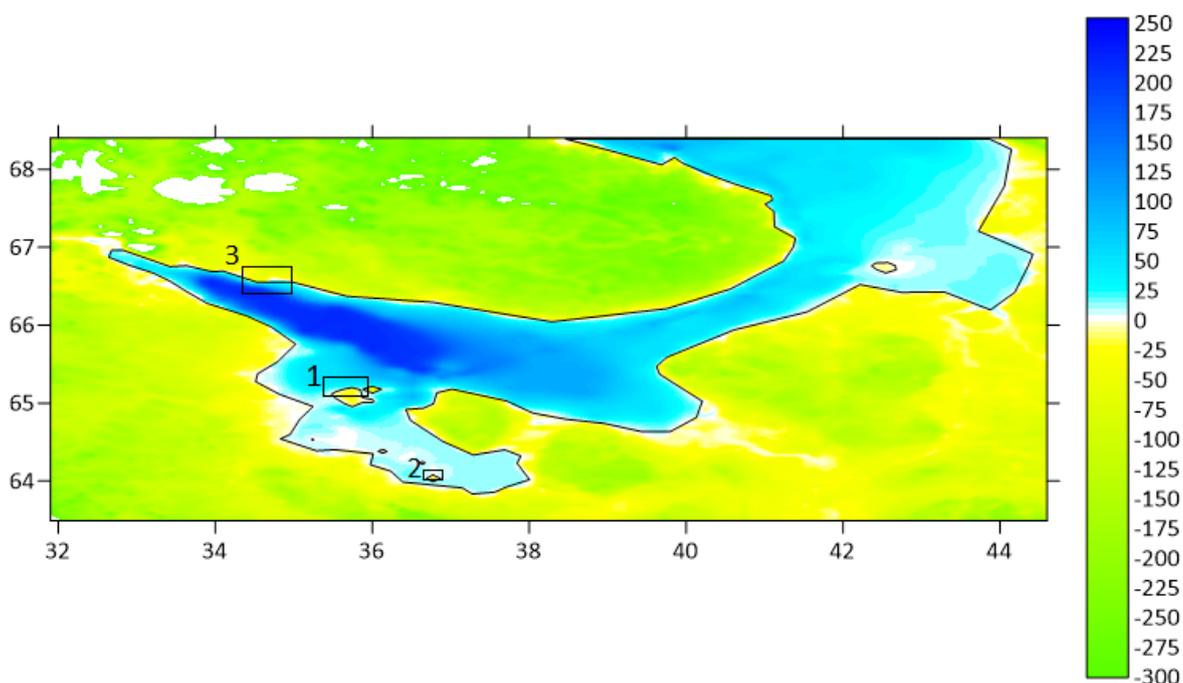


Рис. 3.7. Районы проведения расчетов; 1 - северо-западная часть Соловецкого острова в Онежском заливе; 2 - северная часть острова Коткано в Онежском заливе; 3 - юго-восточная часть полуострова Турий в Кандалакшском заливе.

Эксперимент №1

В районе Соловецкого острова уже давно существуют постоянные популяции мидии съедобной. В качестве источников было задано 100 точек на северо-западном берегу острова (35,5-35,7 в.д.; 65,15-65,20 с.ш.), которые представлены на рисунке 3.8. Источники действовали 72 часа, считалось, что мидии выпускают спат каждые 30 минут и в начальный момент времени находятся на глубине 5 м.



Рис. 3.8. Расположение источников спата для эксперимента №1.

Расчет начинался с 1 июля, распространение спата до последней прикрепленной личинки продолжалось в течение 214 часов (8 дней 22 часа). Т.к. глубина расположения источников считалась равной 5 м, а в прибрежной акватории о. Соловецкий присутствует некоторый перепад глубин, личинки, находившиеся в центре области созданных источников, прикрепилась практически сразу после выпуска их мидиями. На протяжении первого дня нереста личинки, находившиеся ближе к открытой части моря (восточнее относительно берега Соловецкого острова) проплыли в северном направлении расстояние, в среднем равное 4-ем км; спат, находившийся западнее,

переместился на гораздо меньшие расстояния. Направление распространения спата в первые 12 часов совпадало с направлением поверхностных течений в этот день (рис. 3.10).

На протяжении второго дня расчета все больше личинок оседало в центральной части побережья исследуемого района на глубинах 2-7 м. Неприкрепленные личинки начали перемещаться в западном и юго-западном направлениях, отдаляясь от берега. К третьему дню расчетов интенсивность и скорость распространения спата снизилась, личинки вместе с течениями распространялись в западном направлении.

К шестому дню расчетов основная часть спата прикрепилась вблизи побережья острова, некоторая часть личинок после выхода из северной части акватории острова перемещалась в южном направлении, также в этой зоне присутствовали прикрепленные личинки.

В итоге, весь выпущенный спат прикрепился на 428 временном шаге. Можно увидеть, как на протяжении всего времени направление перемещения спата совпадало с направлением течений в исследуемом районе. Очевидно, что спат, переместившийся слишком далеко от прибрежной зоны в места больших глубин, не выживет. В табл. 1 видно, как в зависимости от направления течений в определенный день менялось процентное соотношение прикрепленных и неприкрепленных личинок: в первый день выпуска спата преобладало количество неприкрепленного спата, а ближе к концу расчетов прикрепилось уже 99,9 % выпущенного спата.

Таблица 1. Процентное соотношение распределения спата в эксперименте №1.

Эксперимент №1	
неприкрепленные, %	прикрепленные, %
t=00.00.30	
75,50	24,50
t=00.12.30	
43,96	56,04
t=01.00.30	
11,58	88,42
t=01.12.30	
24,31	75,69
t=03.00.30	
1,93	98,07
t=06.23.30	
0,04	99,96

Распространение личинок представлено на рисунке 3.9:

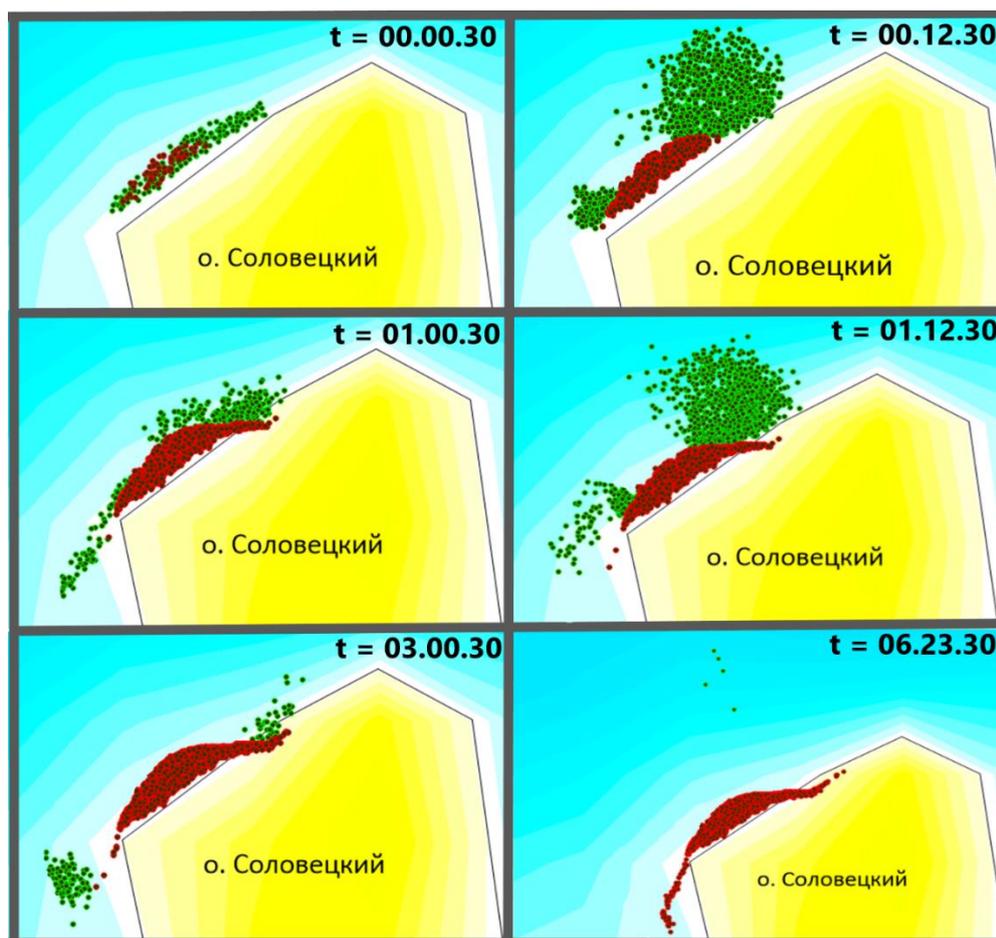


Рис. 3.9. Результаты эксперимента №1. Маркеры красного цвета – прикрепленный спат; маркеры зеленого цвета – неприкрепленный спат.

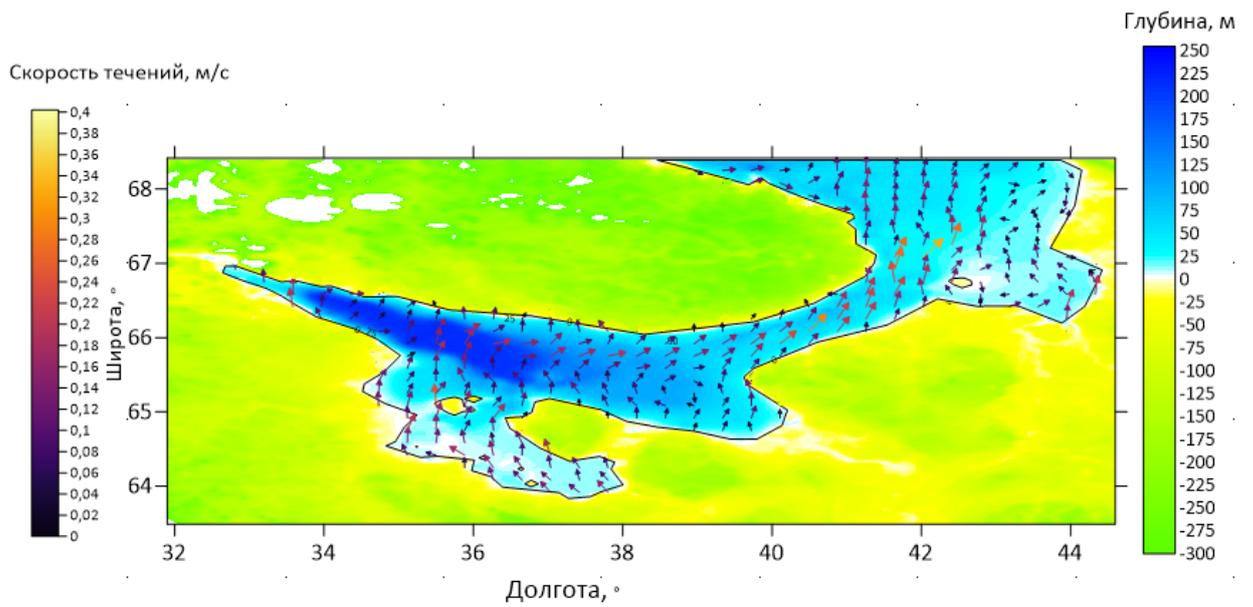


Рис. 3.10. Распределение поверхностных течений на 1 июля 2019 года (1 день расчетов).

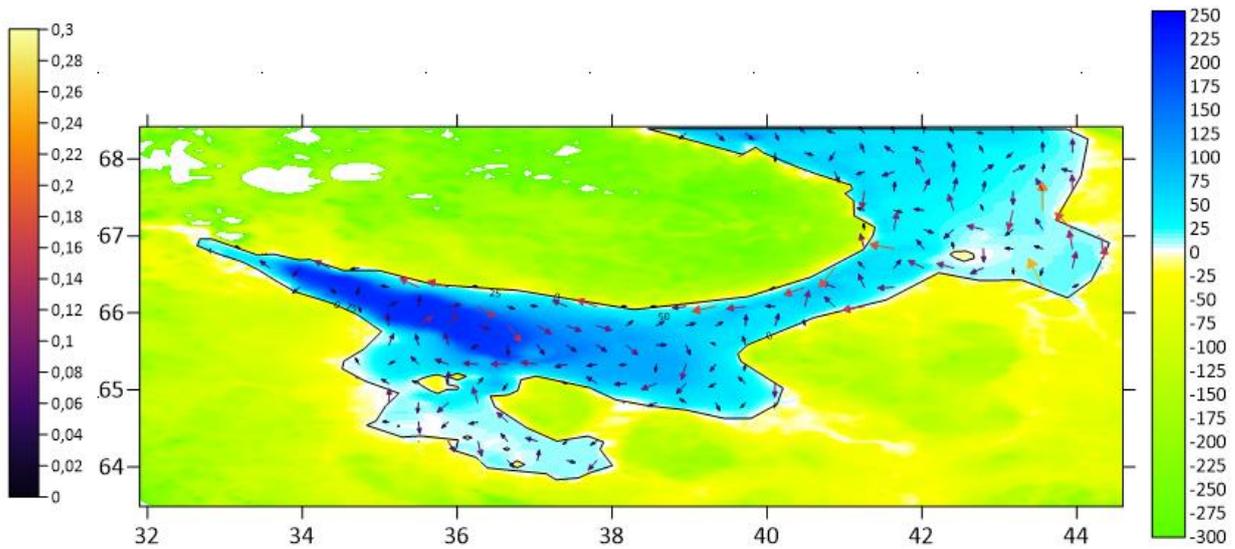


Рис. 3.11. Распределение поверхностных течений на 3 июля 2019 года (3 день расчетов).

Эксперимент №2

Источники спата располагались в северной части острова Коткано (36,72 – 36,81 в.д.; 64,07 – 64,09 с. ш.) на юге Онежского залива в районе существующей мидийной популяции (рис. 3.12).

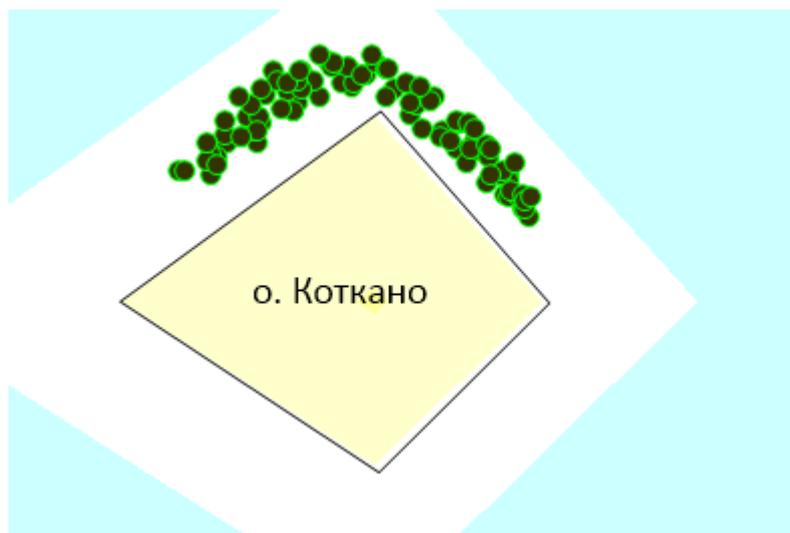


Рис. 3.12. Расположение источников спата для эксперимента №2.

Так как в районе острова Коткано значение глубин колеблется от 0,5 до 2,5 м, начальная глубина расположения источника была принята за 1 м. Распространение спата в случае эксперимента №2 происходило стремительнее: уже в 12 часов 30 минут первого дня личинки проплыли расстояние, приблизительно равное 3-ем км, до глубин 12-14 м. На протяжении 1 дня спат перемещался вместе с течением в северо-западном направлении. Направление течений 1 июля 2019 года можно увидеть на рисунке 3.10. Прикрепилось очень малое количество личинок.

На протяжении второго дня расчета личинки, отделившиеся на большие расстояния от источников в северо-западном направлении, начали перемещаться обратно к острову, двигаясь в южном направлении. Прикрепившихся личинок также было мало.

На третий день расчетов спат начал прикрепляться в прибрежной зоне острова Коткано, чему способствовало юго-восточное направление течений 3 июля 2019 года (рис. 3.11). Можно сказать, что спат «прибило» к берегу, где он осел на твердые субстраты.

Весь спат прикрепился на 181 временном шаге, то есть через 3 дня 18,5 часов от начала расчета.

Так как в южной части Онежского залива глубины относительно небольшие, есть вероятность того, что далеко отплывшие от источников личинки смогут выжить. В эксперименте №2 личинки прикреплялись с достаточно медленной интенсивностью в начале расчетов. Спустя 2 дня 12,5 часов прикрепилась только 20,69% (табл. 2), но к концу эксперимента прикрепленными были уже 100%, что объясняет юго-восточное направление течений в районе о. Коткано 3 июля 2019 г (рис. 3.11).

Таблица 2. Процентное соотношение распределения спата в эксперименте №2.

Эксперимент №2	
неприкрепленные, %	прикрепленные, %
t=00.00.30	
94,00	6,00
t=00.12.30	
96,88	3,12
t=01.12.30	
98,29	1,71
t=02.12.30	
79,31	20,69

Результаты расчета представлены на рисунке 3.13:

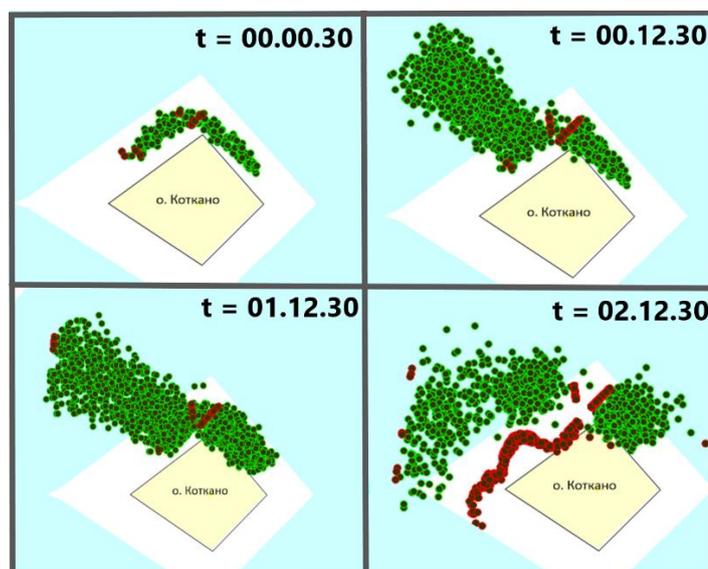


Рис. 3.13. Результаты эксперимента №2. Маркеры красного цвета – прикрепленный спат; маркеры зеленого цвета – неприкрепленный спат.

Эксперимент №3

Южная часть Кандалакшского залива является самой глубоководной частью Белого моря. Но, несмотря на это, мидийные популяции в прибрежных зонах и губах залива считаются самыми распространенными и многочисленными. Также здесь наблюдается более резкое изменение глубин, поэтому начальная глубина расположения источников была принята равной 5 м. Расположение источников на рис. 3.14:



Рис. 3.14. Расположение источников спата для эксперимента №3.

Результат на первый день расчетов показал, что у юго-восточного берега начала обростать новая популяция мидий, спат также перемещался в юго-восточном направлении вместе с течением до глубин, равных 30 м, где, скорее всего, личинки не выживут. Личинки, находившиеся в южной части расположенных источников, перемещались в южном направлении вдоль берега полуострова.

К третьему дню расчетов личинки распространились дальше вдоль южного берега Турьего полуострова, больше личинок осело у берега. На 3 день расчета течения были направлены на северо-запад, что способствовало прикреплению личинок в прибрежной зоне, о чем говорит процентное соотношение спата (табл. 3).

Расчет закончился на 229 временном шаге, то есть через 4 дня 18,5 часов, когда осело 99,98% спата (табл. 3). Можно сказать, что в случае третьего эксперимента, течения имеют меньшее влияние, т.к. район расположения источников защищен от их сильных воздействий. Поэтому перемещения спата имели меньшую скорость и интенсивность.

Таблица 3. Процентное соотношение распределения спата в эксперименте №3.

Эксперимент №3	
неприкрепленные, %	прикрепленные, %
t=00.00.30	
73,50	26,50
t=00.12.30	
33,98	66,02
t=03.00.30	
0,22	99,78
t=04.18.30	
0,02	99,98

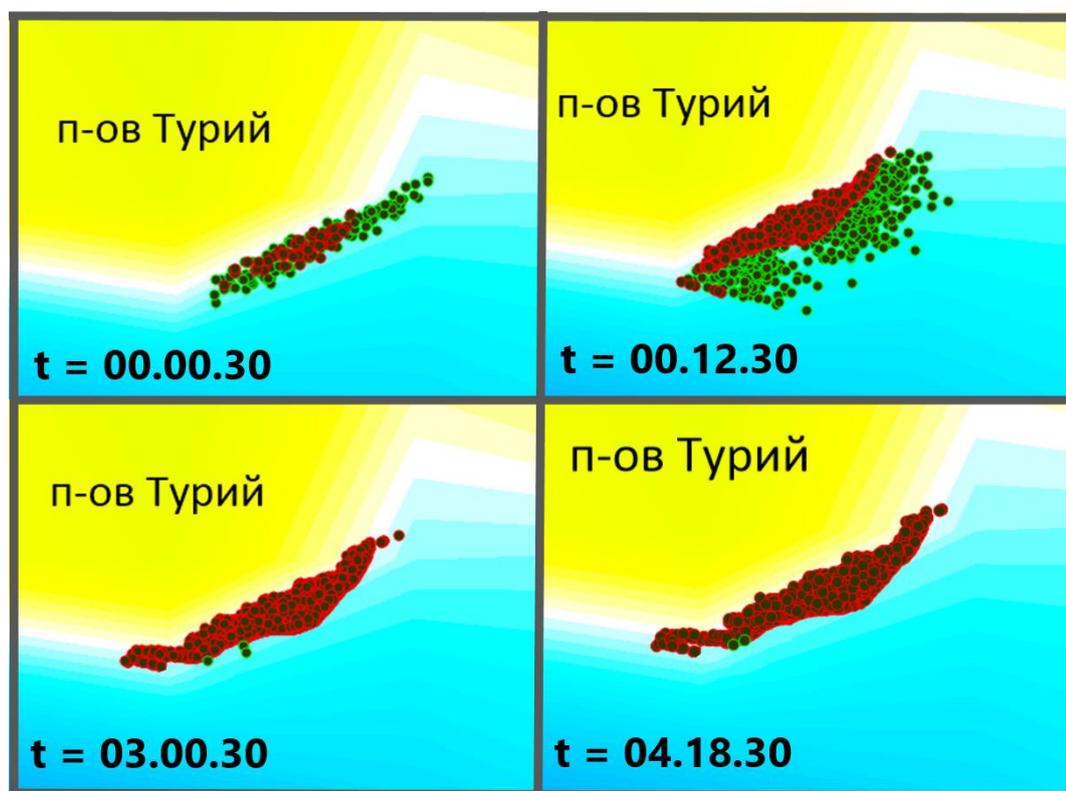


Рис. 3.15. Результаты эксперимента №2. Маркеры красного цвета – прикрепленный спат; маркеры зеленого цвета – неприкрепленный спат.

Таким образом, в результате проделанных экспериментов были выявлены особенности распространения спата мидий в Белом море. Проанализировав полученные результаты, можно сказать, что в каждом районе моря имеются свои механизмы и аномалии распространения спата. Онежский залив из-за своей мелководности является наиболее простым и понятным для моделирования распространения спата; в Кандалакшском заливе мидиевые банки находятся в губах, углубленных в сушу частях акватории Белого моря, что усложняет изучение влияния течений на распространение популяций мидий в этом районе.

В экспериментах отслеживались в основном массовые перемещения личинок мидий. Вывод из проделанных расчетов заключается в том, что массово спат не распространяется на дальние расстояния, а оседает на банках в прибрежной зоне, которые являются источниками выпуска личинок, что позволяет мидиевой банке за счет прикрепившейся молодежи восстановить популяцию, восполнив вымершее старое поколение новым. В этом заключается постоянство существования мидиевой банки, если не учитывать никакие другие внешние факторы и влияние условий среды, а только лишь влияние течений на распространение спата.

Благодаря проделанным экспериментам также было подтверждено, что интенсивность оседания спата на субстраты имеет прямую зависимость от направления и скорости горизонтальных составляющих течений в районе нереста.

Заключение

В результате проделанной работы были изучены физико-географические и гидрологические особенности Белого моря, а именно – гидрологический режим, распределение температуры и солености, течений, ледовый режим и распределение батиметрии для последующего использования при моделировании. Были выявлены основные этапы жизненного цикла беломорской мидии – развитие, половое созревание, нерест; построена карта традиционных мест обитания мидии обыкновенной в Белом море, с выявлением особенностей существования в каждом из районов. Также была доработана существующая численная модель распространения примесей и преобразована в модель 3D расчета непрерывного распределения маркеров от распределенного источника с возможностью моделирования распространения спата. В результате проделанных экспериментов была практически доказана зависимость распределения спата мидий от горизонтальных составляющих скорости и направления течений в Белом море. Основные выводы, полученные после проведения экспериментов заключаются в том, что выпущенный мидиями спат оседает в прибрежной зоне, в районе традиционного местообитания мидиевой банки, тем самым восполняя популяцию во время ежегодного нереста.

Полученные итоговые результаты помогут оптимизировать ведение мидийного хозяйства в Белом море и дадут возможность спрогнозировать распространение спата и должным образом подготовиться к нересту мидий, для более рационального и максимально продуктивного использования посадочного материала.

Список использованной литературы:

1. Белое море. Седиментогенез и история развития в голоцене. / Е. Н. Невеский, В. С. Медведев, В. В. Калининко. – Москва: Академия наук СССР Институт океанологии им. П. П. Ширшова, 1977. – 6-8 с.;
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 2. Белое море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. / Д. Х. Глуховский [и др.]. – Ленинград : Гидрометиздат, 1991. – с.
3. моря СССР / А. Д. Добровольский, Б. С. Залогин. – Москва : МГУ, 1982. – 53-54 с.
4. География России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-beloe-more/>. – Дата доступа: 04.04.2022.
5. Изменчивость температуры поверхностного слоя Белого моря / А. В. Толстикова, – Москва : ГЕОС, 2016. – 26-29 с.
6. База знаний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://proznania.ru/?page_id=2354. – Дата доступа: 09.04.2022.
7. В.Я. Бергер. Продукционный потенциал Белого моря. Исследования фауны морей. Т. 60 (68). – СПб: ЗИН РАН, 2007. 292 с.
8. Лоция Белого моря / Управление гидрографической службы Военно-морского флота. – : , 1964. – с.
9. Результаты комплексных исследований Баренцева и Белого морей по программе «Арктический плавучий университет – 2012" / К. Г. Боголицын. – : , 2012. – 475 с.
10. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОСЕЛЕНИЙ МОРСКИХ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ (на примере Белого моря) / А. В. Герасимова. – Санкт-Петербург : , 2021. – 572 с.
11. Исследование мидии Белого моря / О. А. Скарлато. – Ленинград : , 1985. – 18 с.
12. СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ПОСЕЛЕНИЙ КУЛЬТИВИРУЕМЫХ МИДИЙ В БЕЛОМ МОРЕ / Н. В. МАКСИМОВИЧ, А. А. СУХОТИН. – Санкт-Петербург : , 2000. – 15 с.
13. ДИНАМИКА РАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ПОСЕЛЕНИЙ БЕЛОМОРСКИХ МИДИЙ (MYTILUS EDULIS L.) / В. В. Луканин, А. Д. Наумов, В. В. Федяков. – Ленинград : , . – 14 с.

14. Популяционная структура и рост двустворчатого моллюска *mytilusedulis* L. в бухтах Сельдяная, Круглая, Левая (губа Чупа, Белое море) / К. С. Хачетурова, П. П. Кравец // Вестник МГТУ. – 2017. – . – Т. 20, № 2. – С. 486-492
15. Эколого-биохимический мониторинг состояния некоторых литоральных поселений мидий *Mytilus edulis* L. в Кандалакшском заповеднике / Н. Н. Фокина [и др.] // Вестник МГТУ. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 213-224
16. Изменчивость скорости линейного роста двустворчатых моллюсков *Mytilus edulis* L. (Mollusca, bivalvia) в акваториях Керетского архипелага (Кандалакшский залив, Белое море) / А. В. Герасимова, Н. Ю. Иволина, Н. В. Максимович // Вестник СПбГУ. – 2014. – . – № 4. – С.
17. АНТРОПОГЕННОЕ ВЛИЯНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО СБРОСА ПРЕСНЫХ ВОД ИЗ СИСТЕМ ГЭС В БЕЛОМ МОРЕ НА МЕЛКОВОДНЫХ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ / Г. А. Шкляревич, Е. А. Моисеева// Ученые записки Петрозаводского Государственного Университета. – 2015. – . – № 8. – С. 46-51
18. Таксономическая и биогеографическая структура литоральных беспозвоночных Кандалакшского и Онежского заливов Белого моря / Г. А. Шкляревич// Принципы экологии. – 2013. – . – Т. 2, № 4. – С. 38-55
19. Таксономическое и видовое разнообразие макрозообентоса в Онежском заливе Белого моря / С. Н. Артемьев, А. П. Новоселов, А. Л. Левицкий // Ученые записки Петрозаводского Государственного Университета. – 2017. – . – № 6. – С. 27-37
20. Таксономическое и видовое разнообразие макрозообентоса в Двинском заливе Белого моря / С. Н. Артемьев [и др.] // Arctic Environmental Research. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 308-320
21. Голубые ракушки / П. П. Стрелков, В. М. Хайтов, М. В. Католикова // Природа. – 2012. – . – № 6. – С.
22. Поселения мидий: постоянное непостоянство / В. В. Луканин, А. Д. Наумов, В. В. Федяков // Природа. – 1990. – . – № 11. – С. 56-62
23. Матвеева Т.А. Биология *Mytilus edulis* L. Восточного Мурмана // Тр. Мурман. биол. ст. АН СССР. 1948. Т. 1. С.215-241.
24. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАРИКУЛЬТУРЫ МИДИЙ НА КАРЕЛЬСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ БЕЛОГО МОРЯ / Б. Г. Житний. – Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2003. – 24 с.
25. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РОСТА МИДИЙ *Mytilus edulis* ИЗ РАЗНЫХ РАЙОНОВ БЕЛОГО МОРЯ / Н. Д. Озернюк, А. А. Зотин // Известия РАН. Серия биологическая. – 2006. – . – № 2. – С. 188-192

26. Аквакультура РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aquacultura.org/>. – Дата доступа: 24.04.2022.
27. Промышленное разведение мидий и устриц / И. Г. Жилиякова. – Донецк : АСТ, 2004. – 110 с.
28. Милейковский С.А. Зависимость размножения и нереста морских шельфовых донных беспозвоночных от температуры воды // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. 1970. Т.88. С. 113-148.
29. Милейковский С.А. Лунная периодичность нереста у литоральных и верхне-сублиторальных беспозвоночных Белого моря и других морей // Докл. АН СССР. 1958. Т. 123, вып. 3. С. 564-567.
30. Милейковский С.А. Личинки донных беспозвоночных // Биология океана. М., 1977. Т.1. С.96-106.
31. Буяновский А.К, Куликова В.А. Распределение личинок мидии обыкновенной в планктоне и их оседание на коллекторы в заливе Восток Японского моря // Биология моря. 1984. №6. С. 52-56.
32. YouTube [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=ITophJfxyZI&ab_channel=VadimKhaitov. – Дата доступа: 7.05.2022.
33. Наумов А. Д. Двустворчатые моллюски Белого моря. Опыт экологофаунистического анализа. – СПб., 2006. 367 с.
34. Лизосомальные ферменты в эколого-биохимических адаптациях мидий и амфипод Кандалакшского залива Белого моря. / Р. У. Высоцкая [и др.] // Ученые записки ПГУ. – 2015. – № 6.
35. Спектр изоформ кислой дезоксирибонуклеазы в тканях мидий *Mytilus edulis* в условиях модельной интоксикации нефтепродуктами / В. С. Скидченко, Р. У. Высоцкая, Н. Н. Немова // Труды Карельского научного центра РАН. – 2012. – . – № 2. – С. 131-138
36. Уровень глутатиона и активность глутатион S-трансферазы в тканях мидии *Mytilus edulis* L. при изменении температуры среды / И. В. Суховская [и др.] // Труды Карельского научного центра РАН. – 2014. – № 5. – С. 150-156
37. Copernicus.eu [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://marine.copernicus.eu/> – Дата доступа: 27.03.2022.
38. Gebco.net [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gebco.net/> – Дата доступа: 27.03.2022.

39. Google Earth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://earth.google.com>. – Дата доступа: 01.04.2022.
40. Геологическая библиотека Geokniga [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geokniga.org> – Дата доступа: 01.04.2022.
41. Галкин Л. М. Решение диффузионных задач методом Монте-Карло. – М.: Наука, 1975. – 117 с.
42. Aivosto.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aivosto.com/visustin-ru>. – Дата доступа: 1.06.2022.
43. Расчет распространения икры трески в верхнем слое на водоразделе Норвежского и Баренцева морей на основе гидродинамической модели. / А.С. Аверкиев, В.Ю. Чанцев – Санкт-Петербург – 131 с.
44. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. – Ч. 1.- М.: Наука, 1965. – 380 с.