


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)

«Особенности распределения микропластика в морях Западной
Арктики»

Исполнитель: Рогачева Юлия Евгеньевна

Руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент,

Ерёмина Татьяна Рэмовна

Консультант: канд. географ. наук,

Ершова Александра Александровна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«19» июни 2023г.

г. Санкт-Петербург

2023

Содержание

Введение.....	3
1. Морской мусор в Мировом океане	5
1.1. Современное состояние загрязненности микропластиком.....	5
1.2. Физико-географическая характеристика арктических морей (Баренцево и Карское моря).....	8
2. Обзор загрязнённости пластиком арктических морей и методы отбора микропластика.....	23
2.1. Методы отбора микропластика	23
2.2. Обзор загрязнённости арктических морей	27
3. Исследования источников поступления микропластика в моря Западной Арктики по данным экспедиционных исследований.....	33
3.1. Распределение водных масс в Баренцевом и Карском морях.....	33
3.2. Анализ водных масс Баренцева и Карского морей в период исследования	38
3.3. Анализ распределения микропластика в морях Западной Арктики.....	54
Заключение	61
Литература.....	62

Введение.

Последние года одна из актуальных и обсуждаемых тем человечества является загрязнение пластиком планеты. Но если с пластиком на суше «картина» хоть какая-то имеется (то есть научились регулировать и отслеживать, контролировать и обеспечивать людей к собиранию и переработки пластика), то с водной средой возникает много трудностей, о которых люди даже не задумываются.

Водная толща также сильно загрязнена различными видами пластика, и многие знают про «пять мусорных пятен» в океанах. В связи с интенсивным изучением в последние годы пластика в водной толще, учёные обсуждают формирование шестого пластикового пятна в Западной Арктике. Так как по последним исследуемым данным, воды Арктики являются очень загрязнёнными.

Хотя не могли предположить, что именно этот регион станет таким загрязнённым, так как он не густо населён. Тем не менее судоходство в этом регионе развито интенсивно.

Но достоверных и достаточных данных по-прежнему остается очень мало, которые могли бы с полной определенностью определить и различить пластик. Особенно это проявляется в изучении микропластика, который сложно отследить, так визуально это невозможно, а не все суда оборудованы или приспособлены технически специальным оборудованием для исследования микропластика.

Тем не менее, уже были сделаны некоторые сравнительные работы по поводу содержания и различия микропластика в водах Западной Арктики. И выяснилось, что таким количеством пластикового мусора служат две водные массы. В Баренцево море втекают и приносят пластик Атлантические воды, а в Карском - речной сток, который считается одним из главных источников.

Поэтому целью работы является изучение состава атлантического и речного микропластика в Баренцевом и Карском морях.

Для достижения цели должны быть решены следующие задачи:

- гидрофизический, термохалинный анализ водных масс
- на основе данных содержания микропластика, полученных в экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 выделить пластик речного и атлантического происхождения
- сравнить полученные результаты с проделанными ранее исследованиями [5]

1. Морской мусор в Мировом океане

1.1. Современное состояние загрязненности микропластиком

Загрязнение гидросферы пластиковым мусором и формирование «мусорных пятен» в океане стали одной из главных экологических проблем XXI века в связи с экспоненциальным ростом производства синтетических полимеров, используемых во всех отраслях промышленности. Факторами попадания полимерных отходов в моря и океаны являются судоходство и рыболовство, а также неправильное обращение с отходами на суше, что приводит к выносу реками значительного количества пластиковых отходов в океан. Пластиковые предметы и сети представляют значительную угрозу для морских организмов, а на морских открытых побережьях под воздействием УФ-излучения они быстро разрушаются и превращаются в микропластик, который благодаря своим морфологическим и физико-химическим особенностям является потенциально высокоопасным токсикантом для живых организмов при попадании в пищевые цепи [3].

Морской пластик классифицируют по размеру [4]:

- Мегапластик – куски пластика больше 200мм
- Макропластик – больше 25 мм
- Мезопластик – от 5 до 25 мм
- Микропластик – меньше 5 мм
- Нанопластик – менее 1 мкм

Мегапластик составляет большую часть пластика в океане по массе. Общая масса крупных пластиковых отходов размером более 200 мм составляет более 200 тысяч тонн. Это почти в семь раз больше массы макропластика и мезопластика, которые составляют около 30 тысяч тонн. Однако по количеству частиц эти категории сильно уступают – микропластику с размером частиц менее 5 мм (35 тысч тонн). Именно микропластика в исследуемых территориях Мирового океана больше всего по количеству частиц – 4 850 миллиардов частиц из 5 250 миллиардов общего количества частиц пластика [4].

Микропластик представляет собой крошечные пластиковые частицы, диаметром менее 5 миллиметров.

До недавнего времени Северный Ледовитый океан считался свободным от пластикового загрязнения. Исследования полярных регионов показали, что морская вода и побережья Арктики, несмотря на их значительную удалённость от густонаселённых районов планеты, в целом, значительно загрязнены пластиковыми отходами и микропластиком, а Баренцево море названо местом формирования потенциального шестого мусорного пятна в Мировом океане [5].

Микропластик может быть изначально малого размера или быть частью крупных изделий. Таким образом, выделяют две категории микропластика: первичный и вторичный.

Первичный микропластик представляют собой крошечные частицы, предназначенные для коммерческого использования, например, в косметике, а также микроволокна, сбрасываемые с одежды и других текстильных изделий, таких как рыболовные сети. Он попадает в водные экосистемы в основном либо через сточные воды при смыве остатков косметических средств в канализацию, либо при транспортировке гранул с места их изготовления до места производства пластмассовых изделий, непосредственно в процессе этого производства или при использовании на промышленных площадках [4].

Вторичный микропластик — это частицы, образующиеся в результате разрушения более крупных пластиковых предметов, таких как бутылки с водой. Это разрушение вызвано воздействием факторов окружающей среды, в основном солнечной радиации и океанских волн [6].

Этот тип микропластика очень разнообразен, включает самое большое разнообразие источников - от выбросов твердых частиц в результате промышленного производства или технического обслуживания изделий из пластмассы или изделий. Микрогранулы - это гранулы пластика и пеллеты, то есть шарики/гранулы 2-5 мм в диаметре на основе пластмассы, выброса пыли и волокон, до износа любых пластмассовых изделий при нормальном использовании. Другой важный источник вторичного микропластика - это

дефрагментация более крупных пластиковых предметов в результате потери первоначальных пластичных свойств полимера при «выветривании», то есть под воздействием факторов внешней среды – УФ-излучение, ветер, волны и др. [4].

Значительное количество плавающего пластикового мусора встречается на поверхности Баренцева моря в районах высокой транспортной нагрузки, в частности, была отмечена высокая вероятность нелегального сброса пластикового мусора с судов [3].

Из-за своих небольших размеров и низкой плотности материала частицы микропластика очень легкие, поэтому они легко переносятся ветром или течением. Но из-за того, что пластик быстро включается в биологические процессы (например, обрастает водорослями), со временем его плотность меняется в окружающей среде.

Перенос на большие расстояния, обусловленный глобальной термохалинной циркуляцией, вместе с поступлением из местных морских и прибрежных источников составляют основные пути, по которым пластиковый мусор попадает в окружающую среду Северного Ледовитого океана [5].

Считается, что реки являются значительным переносчиком пластиковых стоков в морскую среду. В Северный Ледовитый океан поступает 11 % мирового стока пресной воды, основной вклад в который вносит Обь (510 км³), Енисей (630 км³) и Лена (530 км³). Расходы этих рек формируют опресненные поверхностные слои на обширных участках континентального шельфа в Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях. Однако Баренцево море получает относительно небольшой речной сток (200 км³ в год), а его поверхностные воды заняты теплыми и солёными атлантическими водами, поступающими из Северной Атлантики [5].

В Северном Ледовитом океане проводилась экспедиция «Арктического плавучего университета» на научно-исследовательском судне «Профессор Молчанов» в 2022 году. Было обнаружено максимальное количество и разнообразие морского мусора в обследованных районах на Новой Земле. Скорее всего мусора туда приносят течения из Баренцева моря. Хотя

бухта Мурманца расположена со стороны Карского моря, в неё попадает ветвь Североатлантического течения, огибающая Новую Землю. Также в Баренцевом море было обнаружено место аккумуляции морского мусора – по данным, самое большое скопление в российской части этого региона [7].

Так как моря Западной Арктики значительно мало исследованы на наличие микропластика, то объектами исследований будут являться Баренцево и Карское моря.

1.2. Физико-географическая характеристика арктических морей (Баренцево и Карское моря)

Баренцево море

Баренцево море относится к окраинным арктическим морям. Оно расположено в западной части евразийского шельфа, при этом вся его акватория находится полностью к северу от Полярного круга ($66^{\circ}33'44''$ с.ш.)

Баренцево море имеет следующие границы (рис. 1.1): такие крупные о-ва как Западный Шпицберген и Северо-Восточная Земля, а также о-ва Северный и Южный архипелага Новая Земля формально не относятся к Баренцеву морю. О-ва Северный и Южный отнесены к Карскому морю, поскольку в качестве его западной границы принята восточная граница Баренцева моря, а о-ва Западный Шпицберген и Северо-Восточная Земля не отнесены ни к Гренландскому, ни к Баренцеву морям. Площадь моря составляет около 1 400 000 км². Баренцево море является самым глубоким среди морей российского сектора Арктики. Рельеф его дна отличается большим разнообразием форм и высокой степенью расчленённости. Средняя глубина составляет 220 м. Самой глубокой является юго-западная часть моря, глубина которой превышает 300-400 м и постепенно увеличивается в направлении Норвежского моря [1].

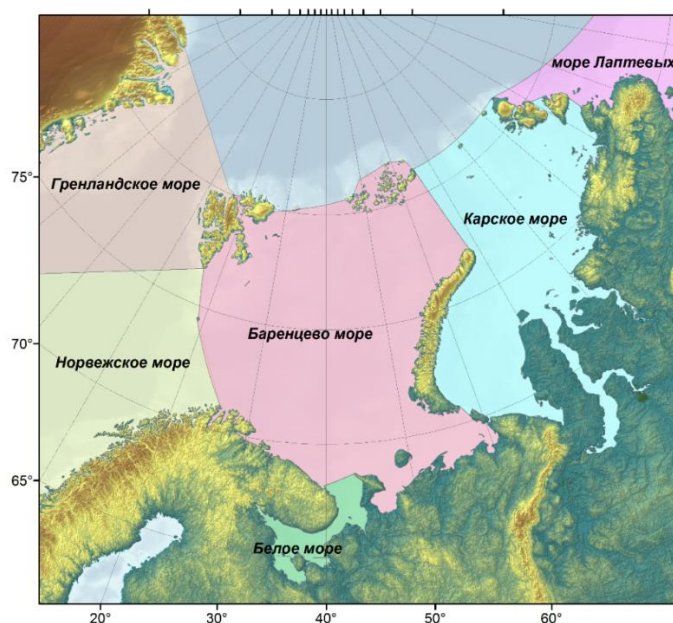


Рис. 1.1. Моря западной части евразийской Арктики и их конвенционные границы [1]

Баренцево море имеет более тёплый климат по сравнению с соседним Карским морем, что обусловлено адвекцией тепла течениями и особенностями теплообмена с атмосферой, который зависит от температуры воздуха. Температура воздуха зависит от взаимодействия холодных арктических и теплых атлантических воздушных масс, разделяемых арктическим фронтом.

Зимой юго-западная часть Баренцева моря находится под влиянием ложбины низкого давления, вдоль которой циклоны несут тёплый воздух из Северной Атлантики. В результате эта часть остаётся свободной ото льда весь зимний период. Также в этой части моря наблюдается самая высокая (от -4 до 0 °C), среднемноголетняя зимняя температура воздуха. Восточная и северная части Баренцева моря в это время года покрыты дрейфующими льдами. Вследствие этого температура воздуха убывает в восточном и северном направлениях. На северной границе Баренцева моря температура воздуха зимой составляет -22 – -24 °C [1].

Весной северные и восточные районы Баренцева моря все еще остаются покрытыми дрейфующим льдом, однако вследствие начавшегося радиационного прогрева площадь, занятая льдами, начинает сокращаться, и наблюдается общее

повышение температуры воздуха. В юго-западных районах она находится в пределах от -2 до 2 °C, а на северной окраине моря составляет $-14-16$ °C.

Летом обычно почти полностью очищается ото льда. Основную роль в формировании поля температуры воздуха играет радиационный прогрев. В самых южных районах температура составляет $6-10$ °C, а на севере моря – $1-2$ °C.

Осенью идет активная отдача тепла водами Баренцева моря в атмосферу и образование льда в его северных и северо-восточных районах. Над морем развивается ложбина низкого давления. В южной части моря температура остается положительной и находится в пределах от 2 до 4 °C. В северной части моря температура понижается до $-10-12$ °C [1].

Баренцево море полностью расположено за Северным полярным кругом, однако его юго-западная часть не покрывается дрейфующими льдами даже в самые суровые зимы.

Если над морем располагается область высокого давления (антициклон) с безветренной и морозной погодой, то происходит интенсивное образование льда.

Для сезонных изменений ледовитости характерна асимметрия, заключающаяся в том, что период нарастания площади ледового покрова длится семь месяцев (с октября по апрель), а период его разрушения – пять (с мая по сентябрь).

Максимального по площади развития ледовый покров достигает в апреле, в это время среднемноголетняя ледовитость составляет 61 %. Сезонный минимум ледовитости (7 %) приходится на сентябрь [1].

На западе моря вдоль кромки шельфа Норвежское течение переносит теплые атлантические воды на север к берегам о-ва Западный Шпицберген. В юго-западную часть Баренцева моря входит теплое Нордкапское течение. Южная ветвь Нордкапского течения переносит воды в восточном направлении вдоль берегов северной Норвегии параллельно Норвежскому прибрежному течению. К северо-востоку от п-ова Варангер эта ветвь удаляется от берегов на значительное расстояние и меняет свое название на Мурманское течение. Из

района Северо-Канинской и Гусиной банок это течение, называемое теперь уже Новоземельским, несет тёплые воды дальше на северо-восток вдоль западного склона Новоземельской банки к выходу из Баренцева моря. Северная ветвь Нордкапского течения входит в Западный желоб и переносит воды на северо-восток вдоль его восточного склона. Поскольку в крупных понижениях дна воды переносятся циклонически (склон остается справа по ходу движения), часть атлантических вод рециркулирует в желобе и переносится на юго-запад вдоль склона Шпицбергенской банки (рис. 1.2) [1].

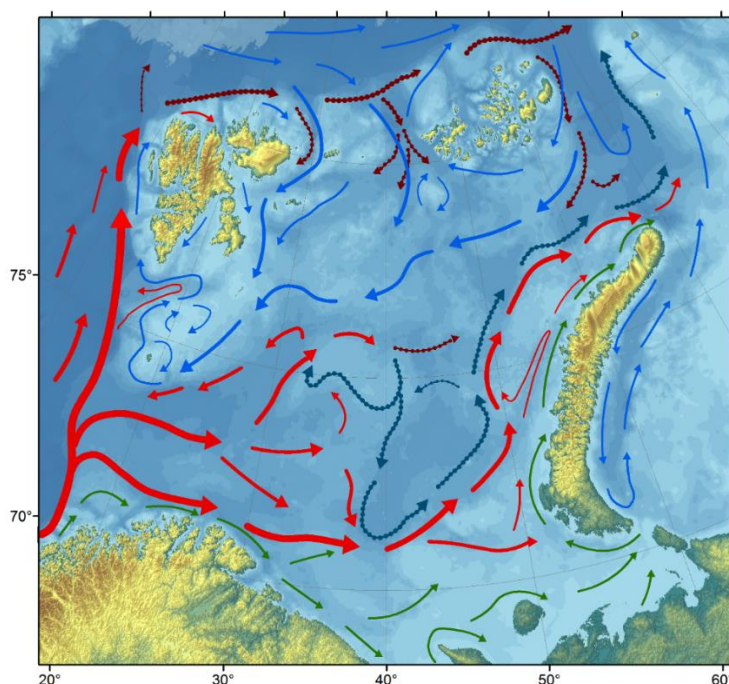


Рис. 1.2. Схема течений Баренцева моря (красными стрелками показан перенос вод атлантического происхождения, зелеными – прибрежных вод, синими – арктических, темно-синим пунктиром – холодных донных вод, темно-коричневым пунктиром – атлантических трансформированных вод)

Норвежское течение после отделения от него Нордкапского именуется Шпицбергенским течением. Последнее переносит теплые и солёные воды дальше на север и дает ответвление в Зюйдкапский желоб. Еще одним местом, где воды «атлантического слоя» поступают в Баренцево море, является западный склон желоба Св. Анны [1].

Еще одним источником теплых вод в юго-западной части Баренцева моря является Норвежское прибрежное течение. Достигнув прибрежной зоны

Мурмана, это течение переходит в Мурманское прибрежное течение, которое у северо-восточной оконечности Кольского п-ова уходит в Белое море. Вдоль западного берега п-ова Канин входит Беломорское течение, продолжение которого несет относительно холодные и значительно опресненные воды в восточном направлении [1].

Еще одним прибрежным течением в восточной части моря является Новоземельское прибрежное течение. Оно начинается от пролива Карские ворота как течение Литке, несущее холодные и сильно опресненные воды Карского моря вдоль юго-западного берега о-ва Южный архипелага Новая Земля [1].

Холодные арктические воды северной части частично приносятся течениями из Арктического бассейна, частично формируются в самом Баренцевом море. Поступление арктических вод извне происходит преимущественно в верхнем 100-метровом слое через проливы между архипелагами Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля. Арктические воды, входящие в море через его северо-восточную границу южнее арх. Земля Франца-Иосифа, переносятся в западном направлении, формируя течение Персея в районе южного склона одноименной возвышенности. Воды, входящие через северные проливы, образуют Восточно-Шпицбергенское течение, иногда называемое течением Баренца. В районе о-ва Надежды течения Персея и Восточно-Шпицбергенское соединяются, давая начало Медвежинскому течению, которое несёт холодные арктические воды в юго-западном направлении. Следуя особенностям топографии Шпицбергенской банки, арктические воды огибают её южнее о-ва Медвежий и следуют в Зюйдкапский желоб. Получив подпитку из Стур-фиорда, холодные воды затем огибают южную оконечность о-ва Западный Шпицберген и движется на север узкой полосой вдоль его берегов [1].

Баренцево море характеризуется снижением температуры воды к восточным границам моря, а также к северным. При этом данная особенность проявляется на всех глубинах и во все сезоны года (рис. 1.3 и 1.4). Также в юго-

западной части моря температура воды положительна в течении всего года. На остальной же части моря, в зимние время вода покрывается дрейфующим льдом.

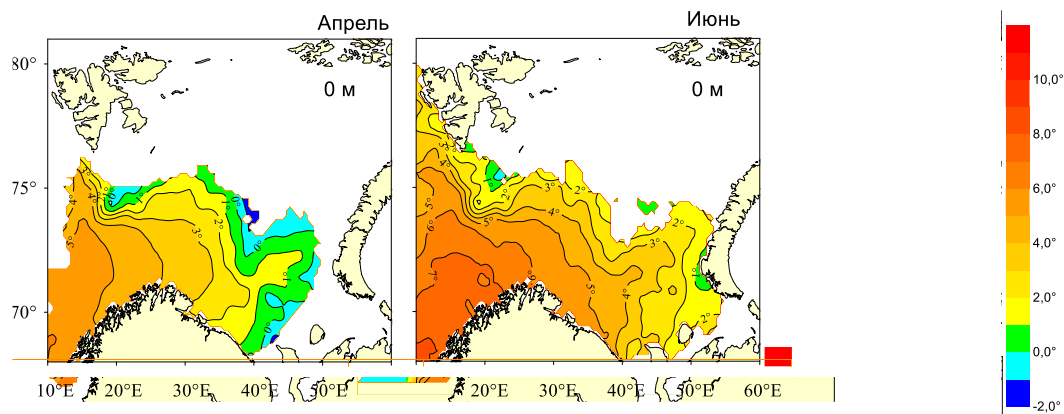


Рис. 1.3. Среднемноголетнее (1951-2010 гг.) распределение температуры воды весной и летом в Баренцевом море на поверхности [1]

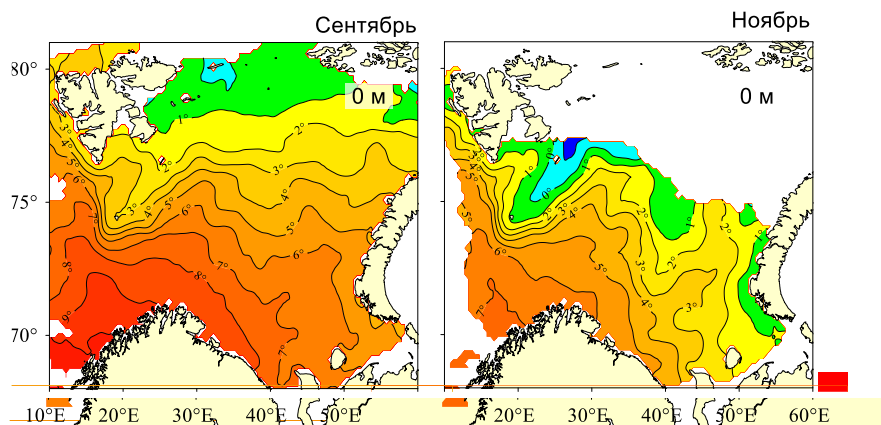


Рис. 1.4. Среднемноголетнее (1951-2010 гг.) распределение температуры воды осенью в Баренцевом море на поверхности [1]

К концу зимнего периода (апрель) свободной ото льда остается лишь занятая атлантическими и прибрежными водами юго-западная часть моря. Температура воды в этих районах во всей толще от поверхности до дна находится в пределах от 1 до 5 °С, в восточном направлении она постепенно понижается до отрицательных значений. В результате радиационного прогрева к концу весны (июнь) площадь дрейфующих льдов заметно сокращается, а температура воды в поверхностном слое моря повышается до 2-7 °С (рис. 1.3).

В летний период температура воды поверхностного слоя близка к температуре воздуха. В конце лета море почти полностью очищается от

дрейфующих льдов. Температура воды в его юго-западной части на поверхности составляет 8-9 °С, понижается до 5-7 °С на юго-востоке моря и до 0-1 °С на северной границе (см. рис. 1.4). Однако к концу лета значительно прогревается лишь верхний слой толщиной 20-40 м.

В сентябре в северных районах моря начинается радиационное выхолаживание поверхностных вод и к концу осени (ноябрь) эта акватория покрывается дрейфующим льдом, температура воды поверхностного слоя в свободных ото льда районах понижается до 2-7 °С [1].

Общий характер распределения солёности на акватории моря в наибольшей степени зависит от адвекции солёных атлантических и опреснённых арктических вод. Самая высокая солёность (34.9-35.1 епс) во всей толще от поверхности до дна во все сезоны года наблюдается в юго-западной части моря в зоне Нордкапского течения (рис. 1.5 и 1.6). По мере распространения этих вод на восток и северо-восток их солёность в глубинных слоях понижается до 34.8-34.9 епс.

Солёность с севера на юг понижается до 34.0-34.5 епс. Это происходит из-за стока рек Норвегии и Кольского полуострова.

В юго-восточную часть с Беломорским течением вдоль западных берегов п-ова Канин поступают воды Белого моря с солёностью около 33.0 епс. На крайнем юго-востоке под влиянием таяния льда и пресноводного стока Печоры солёность понижается до самых низких значений (31.0-33.0 епс). Еще одним районом, где в летний период в поверхностном слое происходит значительное понижение солёности (до 32.0-34.0 епс), является участок вдоль западных берегов о-ва Южный архипелага Новая Земля. Понижение солёности здесь происходит за счёт таяния морского льда, пресноводного стока многочисленных мелких рек и ручьев, обусловленного таянием снега, и выноса опреснённых вод из Карского моря течением Литке. В северной части моря низкая солёность вод поверхностного слоя (33.0-34.0 епс) летом обусловлена таянием дрейфующего льда и пониженным фоном солёности арктических вод, занимающих эти районы [1].

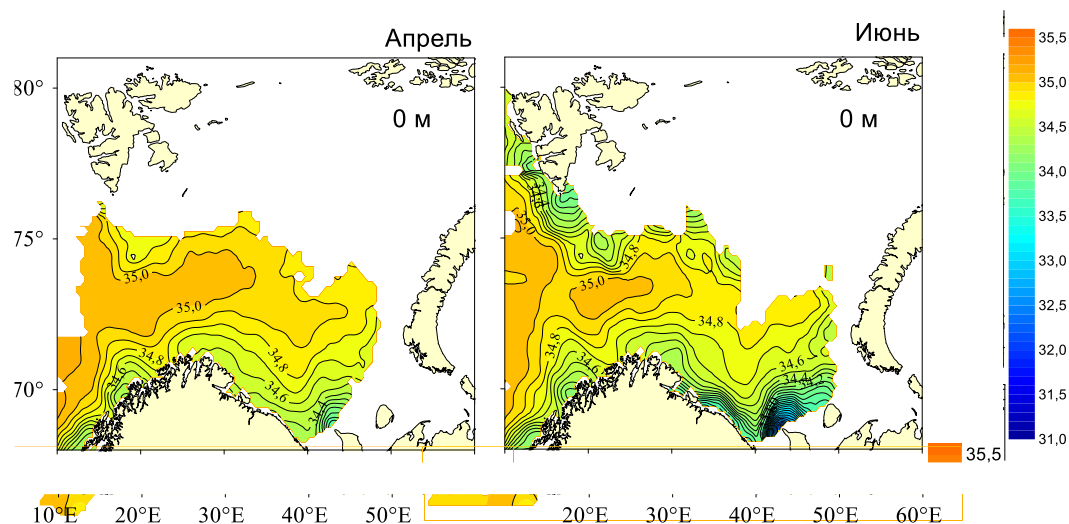


Рис. 1.5. Среднемноголетнее (1951-2010 гг.) распределение солёности в Баренцевом море на поверхности весной и летом [1]

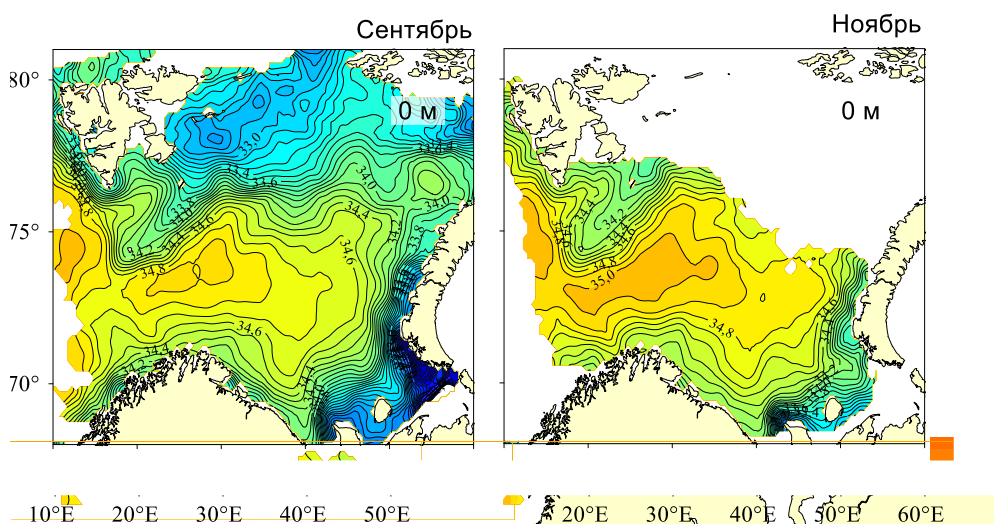


Рис. 1.6. Среднемноголетнее (1951-2010 гг.) распределение солёности в Баренцевом море на поверхности осенью [1]

Определенное влияние на режим солёности морей оказывают испарение и осадки. Испарение повышает солёность, осадки, наоборот, понижают её.

Зимой плотность достигает максимальных значений. В районе Центральной впадины она даже на поверхности превышает 28.0 (см. рис. 1.7) [1]. У берегов Кольского полуострова и северной Норвегии плотность убывает до 27.5-27.6.

К концу весны (июнь) под влиянием радиационного прогрева и пресноводного стока с суши плотность в поверхностном слое значительно

понижается. Самые низкие значения (26.0-27.0) наблюдаются у побережья Мурмана и м. Канин Нос [1]. Наибольшие значения составляют 27.6-27.7

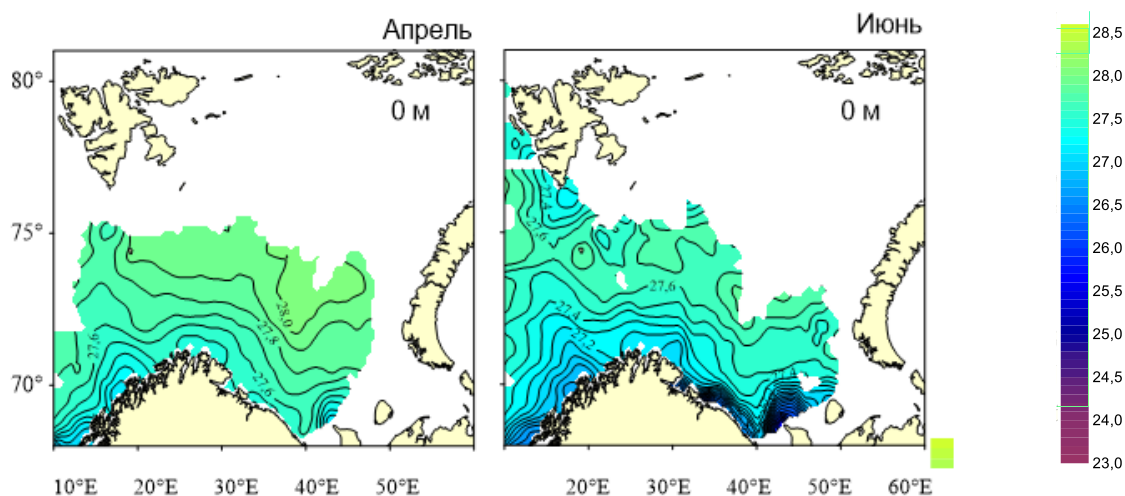


Рис. 1.7. Среднегодовое (1951-2010 гг.) распределение условной плотности в Баренцевом море на поверхности весной и летом [1]

Глубокий минимум плотности в поверхностном слое, наблюдающийся в августе, обусловлен совместным влиянием солнечной радиации и пресноводного стока. Значительные различия в изменениях плотности на поверхности и на глубине 10 м, вероятно, связаны с тем, что сильно опресненные воды, выходящие из Кольского залива, распространяются в тонком поверхностном слое, в результате чего формируется большой вертикальный градиент солености и, соответственно, плотности [1].

Многочисленные проливы на границах Баренцева моря играют важную роль в формировании его океанографических условий, поскольку через проливы происходит водообмен с соседними морями (Норвежским, Гренландским, Белым, Карским) и Арктическим бассейном.

Таким образом наиболее значительный водообмен Баренцева моря с соседними водными объектами следует ожидать на его юго-западной и северо-восточной границах.

Водообмен с Карским морем происходит через пролив между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля (о-в Сальм – м. Желания). Данный пролив очищается ото льда полностью только в аномально теплые годы.

Водообмен в южных новоземельских проливах (Карские Ворота, Югорский Шар и Маточкин Шар) идёт в обоих направлениях. Однако сток вод из Баренцева моря превышает их поступление из Карского моря. Наиболее интенсивный водообмен наблюдается в проливе Карские Ворота.

Карское море.

Восточнее Новой Земли расположены моря Сибирской Арктики, на западной окраине которых лежит Карское море. Западная граница моря проходит от м. Кользат до м. Желания, далее по восточным берегам Новой Земли, по западной границе пролива Карские Ворота от м. Кусов Нос до м. Рогатый, восточному берегу о. Вайгач и по западной границе пролива Югорский Шар от м. Кользат до м. Арктический на о. Комсомолец (Северная Земля). Восточная граница моря проходит по западному берегу островов архипелага Северная Земля и восточным границам проливов Красной Армии, Шокальского и Вилькицкого, а южная граница — по материковому берегу от м. Белый Нос до м. Прончищева. В этих пределах море занимает пространство между параллелями $81^{\circ}6'$ и $66^{\circ}0'$ с. ш. и между меридианами $55^{\circ}2'$ и $104^{\circ}1'$ в. д. Карское море широко открыто к Северному Ледовитому океану и в большей части лежит на материковой отмели, поэтому оно относится к типу материковых окраинных морей. Его площадь равна 883 тыс. км², объем — 98 тыс. км³, средняя глубина 111 м, наибольшая глубина 600 м [2].

Карское море характеризуется полярным морским климатом. Относительная близость Атлантического океана несколько смягчает климат моря, но Новая Земля служит барьером на пути тёплого атлантического воздуха и вод, поэтому Карское море климатически более сурово, чем арктическое Баренцево [2].

Большая протяженность Карского моря с юго-запада на северо-восток создает заметные различия климатических показателей в его разных районах во все сезоны года. В начале холодного сезона в северной части моря преобладает северный ветер, а в южной — ветры неустойчивы по направлению. Скорость ветра в это время обычно равна 5—7 м/с. Зимняя барическая ситуация

обуславливает преобладание в большей части моря южных, юго-западных и юго-восточных ветров. Ветры южных направлений, как правило, приносят в Карское море сильно охлажденный над материком континентальный воздух. Среднемесячная температура воздуха в марте на м. Челюскина равна -28.6°C , на м. Желания -20°C , а минимальные величины температуры воздуха в море могут достигнуть -45 — 50°C . Однако с южными ветрами в западную часть моря иногда поступает и относительно тёплый морской полярный воздух. Его приносят циклоны, приходящие с запада и отклоняющиеся на юг и юго-восток, так как встречаются на своем пути цепь Новоземельских гор. Весной дуют ветры, неустойчивые по направлению, скорость которых обычно не превышает 5 — 6 м/с.

Циклоническая деятельность ослабевает. Весенний прогрев происходит довольно быстро, но не приводит к значительным повышением температуры воздуха. В мае среднемесячная температура воздуха держится около -7° на западе и около -9°C на востоке моря. Летом над морем формируется местная область повышенного давления, что приводит к преобладанию ветров северных румбов со скоростями 4 — 5 м/с. В самом тёплом месяце (июле) температура воздуха в среднем равна 5 — 6°C в западной части моря и 1 — 2°C на востоке и северо-востоке. В отдельных районах материкового побережья температура воздуха может повышаться до $+18^{\circ}\text{C}$ и даже $+20^{\circ}\text{C}$. В любой летний месяц может быть снегопад. В общем, лето короткое и холодное с пасмурной дождливой погодой. Сильное зимнее охлаждение и слабый летний прогрев, неустойчивая погода в холодный сезон и относительно спокойное состояние атмосферы летом — характерные черты климата Карского моря [2].

Суровый климат Карского моря обуславливает его полное замерзание в осенне-зимнее время и круглогодичное существование льда в нём. Льдообразование начинается в сентябре в северных районах моря и в октябре на юге. С октября по май почти всё море покрыто льдами разного вида и возраста [2].

Основное место в гидрологической структуре вод Карского моря занимают поверхностные арктические воды и их разновидность, сформированная при смешении с пресными материковыми водами. Движение поверхностных и глубинных вод Карского моря создает в нем относительно устойчивую систему течений, связанную с циркуляцией вод Арктического бассейна, водообменом с соседними морями и речным стоком. Последний не столько возбуждает течения, сколько поддерживает их устойчивость.

На долю этого моря приходится в среднем около 55% (1290 км³/год) общего стока во все моря сибирской Арктики. Обь ежегодно приносит примерно 510 км³ воды, Енисей — порядка 630 км³. При столь значительном речном стоке распределяется он весьма неравномерно во времени и по пространству моря. Примерно 80% речной воды приходит в море в конце лета — начале осени (июнь — сентябрь). Зимой в очень небольших количествах в море вливается вода только наиболее крупных рек. Практически весь материковый сток поступает в Карское море с юга [2].

Для Карского моря характерны циклонический круговорот в западной части и разнонаправленные потоки в южных, центральных и северных районах.

Западное кольцо течений образуют частично баренцевоморские воды, поступающие сюда через южные Новоземельские проливы и движущиеся к Ямалу и далее на север вдоль его западного берега. У северной оконечности полуострова это Ямальское течение усиливается Обь-Енисейским, а ещё севернее оно даёт ответвление к Новой Земле. Здесь этот поток поворачивает на юг и в виде Восточно-Новоземельского течения движется вдоль берегов Новой Земли, к югу от которой оно сливается с баренцевоморскими водами, входящими в Карское море через упомянутые проливы, тем самым замыкается циклонический круговорот. Циклопический круговорот вод ограничен крайней юго-западной частью моря и течения в нём несколько ослаблены. В южных районах моря, возле Оби и Енисея, кроме Обь-Енисейского начинается и Западно-Таймырское течение, воды которого преимущественно выносятся в пролив Вилькицкого, а частично распространяются вдоль западного побережья

Северной Земли к северу. В центральной части моря прослеживается течение Святой Анны, направленное к северу и уходящее за пределы Карского моря (см. рис. 1.8) [2].

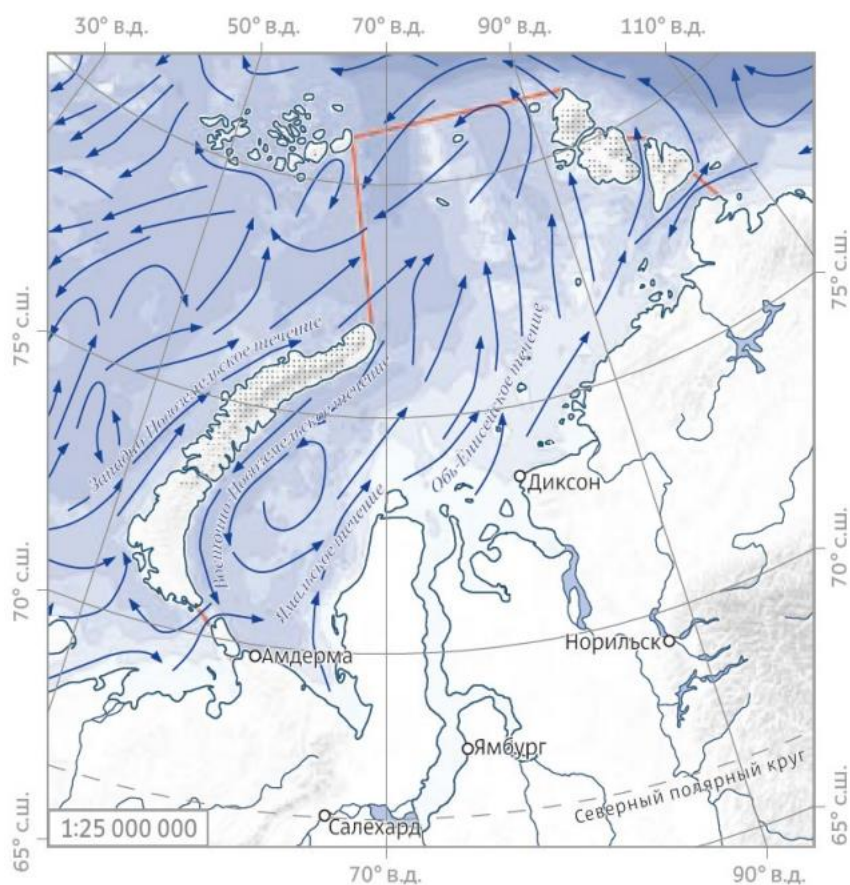


Рис.1.8. Циркуляция вод Карского моря

Карское море прогревается очень слабо, что обуславливает невысокую температуру его вод. На поверхности она в общем понижается с юго-запада на северо-восток. В осенне-зимний сезон поверхность моря интенсивно выхолаживается и на открытых пространствах температура воды быстро понижается. Зимой в подлёдном слое она повсеместно близка к температуре замерзания воды данной солёности ($-1.5—1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$).

В тёплое время года (весной) тепло расходуется прежде всего на таяние льда, поэтому температура воды на поверхности практически не отличается от зимней. Лишь в южной части моря, раньше других освобождающейся ото льда и испытывающей влияние материкового стока, температура поверхности моря постепенно повышается.

Летом, в самые теплые месяцы (июль и август), на свободных ото льда пространствах температура воды на поверхности равна 3—6 °С, а под льдом она немного поднимается над точкой замерзания [2].

Свободное сообщение с океаном, большой материковый сток, образование и таяние льда определяют величины и распределение солёности в Карском море. Солёность его поверхностных вод меньше средней солёности океана и меняется в пределах от 3—5 епс в южной части моря до 33—34 епс на севере. Кроме того, она испытывает сезонные колебания. В холодное время года, когда речной сток мал и происходит интенсивное льдообразование, солёность характеризуется повышенными значениями. Исключая устьевые области, солёность на поверхности равна 25—30 епс и увеличивается в общем с юга на север. В теплые сезоны весенний приток речных вод уменьшает поверхностную солёность в приустьевых участках и в прибрежной полосе. В дальнейшем таяние льдов и максимальное распространение речных вод летом распресняют поверхностный слой, причём складывается довольно сложное распространение величин солёности. Наиболее низкая солёность (5—10 епс) наблюдается в районах устьев Оби, Енисея и других крупных рек. Севернее Обь-Енисейского мелководья солёность поверхностных вод увеличивается до 15—20 епс. Такую же солёность имеет юго-западная часть моря. Для северных районов Карского моря к северу и северо-востоку от м. Желания солёность поверхностных слоев характеризуется быстрым повышением с юга на север. В северных районах отмечены наиболее высокие значения солёности (33.8—34.0 епс) [2].

Однако такое распределение солёности изменяется таянием льдов. Среди плавающих льдов можно наблюдать солёность на поверхности на 7—8 епс ниже, чем на свободных ото льда участках моря. В толще воды солёность увеличивается от поверхности ко дну. Зимой на большей части моря она относительно равномерно повышается от 30 епс на поверхности почти до 35 епс у дна [2].

Распределение солёности и температуры в море обуславливает распределение величин плотности воды, при этом определяющее влияние на

плотность оказывает солёность. В связи с этим воды южной и восточной частей Карского моря имеют меньшую плотность по сравнению с водами северных и западных районов. Осенью и зимой они более плотны, чем весной и особенно летом. Осенью, зимой и в начале весны по всему морю характерно плавное и сравнительно небольшое повышение плотности от поверхности ко дну. Летом во время максимального распространения речных вод в море и при таянии льдов плотность верхнего слоя (5—10 м) весьма понижена, а под ним она велика [2].

2. Обзор загрязнённости пластиком арктических морей и методы отбора микропластика

2.1. Методы отбора микропластика

Исследования микропластика в рассматриваемой акватории Баренцева и Карского морей начались всего несколько лет назад. Поэтому одна из первых проблем по изучению микропластика заключалась в том, что данных для изучения достаточно мало.

Вторая проблема по изучению содержания микропластика в водной толще, с которой столкнулись учёные по всему миру, это отсутствие единой утвержденной методики. Каждый регион или страна руководствуется существующими руководящими документами в данном регионе. Поэтому сопоставлять и сравнивать данные практически не представляется возможным из-за использования разных методов отбора.

Последние исследования показывают, что концентрации микропластика, полученные фильтровальными установками, могут быть в два-три раза выше, чем концентрации частиц в пробах, отобранных методами сетных ловов — манта-тралом и планктонными сетями (например, концентрация МП повышается с уменьшением размера частицы).

Существуют рекомендации некоторых европейских и американских организаций (например, Национальное управление по исследованию океана и атмосферы США NOAA или Европейская комиссия). Но так как сейчас не существует стандартного протокола анализа микропластика в пробах воды, то выбор метода определения зависит от качества и объёма пробы, уровня загрязнённости, а также от приборной базы, технических возможностей и условий в лаборатории.

Полевые методы исследования делятся на мониторинг макро- и мезомусора, то есть визуально легкоразличимы и нет необходимости в специальных инструментах для пробоотбора, так как зачастую исследования проводятся на судне. А вот для мониторинга микромусора и микропластика требуются специальные приборы. Помимо приборов, также для

количественного и качественного определение микромусора и микропластика требуются специализированные лабораторные методы обработки проб [4].

1) Методы отбора.

1. Мониторинг плавающего мусора (визуальный метод)/поверхность	Макро и мезопластик
2. Сеть «манта-трал»/поверхность	Микропластик
3. Нейстонная сеть (буксируемая) / поверхность	
4. Система батометров/водная толща	
5. Фильтровальные установки (погружной насос)/подповерхностный слой	

В экспедициях использовались два метода: нейстонная сеть (исследования [5]) и погружной насос (экспедиция ТРАНСАРКТИКА-2019 и исследования [5]).

Самым распространенным методом является использование «манта-трал», который представляет собой сеть с размером ячеи 300 мкм, прикрепленной к корпусу с металлическими крыльями, позволяющий осуществлять отбор пробы с поверхностного горизонта [8].

Для открытых морских акваторий чаще используют нейстонную сеть с двумя крупными поплавками по бокам вместо крыльев для лучшей стабилизации сети на поверхности моря. Основным преимуществом сетей и тралов состоит в быстрой фильтрации большого объема воды. Они позволяют делать съёмку большой площади океана о распределении микропластика в поверхностном слое воды. Обязательным условием для этого является установка на сеть расходомера воды для возможности пересчёта количества частиц на объём профильтрованной воды. Длина сетей может быть разной, но для морских исследований применяются сети длиной 3-4 м, с толщиной поверхностного слоя 25-50 см. Сеть буксируется со скоростью судна не более 2-3 узлов, а время буксировки составляет до 30-40 минут в зависимости от количества органического

взвешенного материала в воде. Результаты получают в виде массы частиц или их количества на метр квадратный или кубический [4].

Использование «манта-трала» и нейстонных сетей имеет несколько минусов. Первое - поддержания в течение длительного времени малой скорости судна (2-3 узла), что не очень удобно для многих научно-исследовательских судов. Второе - сильное волнение, которое препятствует возможности отбора проб. Третье - запрет на работу с заборным оборудованием в определенных зонах морей или невозможность остановки судна в некоторых зонах. И в-последних, при отборе проб воды происходит значительная потеря самой пробы в связи с необходимостью вымывать осажденный фильтрат на палубе с помощью шланга, т.к. крайне трудно вымыть всю пробу из сети.

Использование проточной системы судна с встраиваемой фильтровальной системой позволяет не зависеть от всех этих факторов и производить отбор проб на всем протяжении маршрута следования судна, в независимости от возможности остановки судна, погодных и иных условий [4].

Метод использования фильтровальных установок используется достаточно часто, особенно как дополнение к методу отбора проб нейстонными (буксируемыми) сетями. Однако, результаты отбора проб этими двумя методами сложно сравнивать в связи с разными единицами измерения содержания микропластика в воде (шт./м² или шт./м³), а также разными размерными фракциями отбираемого микропластика. Этот метод подразумевает использования погружного насоса, который закачивает воду с глубин до 5 м (подповерхностный слой). В систему встраивается фильтровальная установка, состоящая из серии металлических фильтров различного размера ячеей для улавливания различных фракций микропластика (50, 100, 200 мкм). Фильтры являются съёмными, что позволяет их быстро менять, а на самой системе устанавливается счётчик воды, позволяющий получить объём профильтрованной воды точностью более высокой, чем на нейстонных сетях [4].

Отбор проб воды в экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 для определения содержания микропластиковых частиц проводился с помощью разработанного

коллективом авторов пробоотборника HydroPuMP. Он встроен в проточную систему судна: морская вода фильтруется через металлический фильтр размером 100 мкм, объём профильтрованной морской воды — в среднем 1500 л на пробу [3].

Пробоотборник-фильтр HydroPuMP представляет собой специальное устройство со сменными насадками и металлической сетью-фильтром с различными размерами ячеей, подключаемое к проточной системе (насос в килевой части судна, забирающий забортную воду по ходу судна с глубины 4.5 м из подповерхностного слоя) с включением в цепь счетчика воды. Все составляющие системы последовательно соединены шлангом. Данная система содержит минимальное количество пластиковых частей — все компоненты, кроме шланга, состоят из стали и других металлических сплавов. В ходе отбора проб в обязательном порядке также фиксируются такие параметры окружающей среды, как температура и соленость воды (CTD-зондирование), скорость и направление ветра, скорость хода судна, координаты точки отбора.

Плюсы данного пробоотборника: получении проб воды на содержание микропластика в любых условиях, не зависящих от источника питания, расширении диапазона размерности определяемых частиц, повышение точности определения, упрощении конструкции и снижении требований к подготовке пользователя устройства.

Метод использования батометров, опускаемых на карусели типа «розетка», где отбор полнообъёмных проб с последующей фильтрацией воды через серию сит или фильтров. Одним из преимуществ метода — это возможность отбирать пробы воды на различных горизонтах. Но также, есть и большой недостаток — маленький исходный объём воды (10-100 л воды), не позволяющий получить характерную выборку частиц. Поэтому данный метод не считается достоверным методом для отбора проб воды на микропластик [4].

Исследование химического состава микрочастиц было проведено неразрушающим и бесконтактным оптическим методом — методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), Raman spectroscopy

(англ.). Съёмка спектров осуществлялась в геометрии обратного рассеяния (рассеяние назад) на спектрометре KPC Senterra (Bruker). Для возбуждения комбинационного рассеяния использовался твердотельный лазер с длиной волны 785 нм. Фактическая мощность под 50х объективом с числовой апертурой 0.75 составляла от 0.06 до 1 мВт и для каждого образца подбиралась индивидуально в целях избежания возможной деструкции образца [3].

Исследовалось до 50 % частиц (образцов) из каждой пробы. Все частицы с идентифицируемыми промышленными пигментами рассматривались как вещества искусственного (антропогенного) происхождения и входили в общее число антропогенных полимерных частиц.

Самым известным протоколом лабораторного исследования в мире является программа NOAA для количественного анализа микропластика в воде.

Лабораторный анализ проб включал следующие этапы: 1) мокрое просеивание/фильтрация взвеси, 2) высушивание – для определения количества твёрдых веществ, 3) термохимическая обработка – избавление от органического вещества (реактив Фентона и др.) для растворения органического вещества, 4) отделение от взвеси с помощью раствора (например, хлорид цинка), 5) высушивание 5) морфологический анализ (визуальный) – определение размеров, цвета и формы частиц на микроскопе, 6) Анализ полимерного состава частиц.

С помощью стереомикроскопа Bresser (увеличение 40х) осуществлялась первичная визуальная идентификация, подсчёт и категоризация микрочастиц (определение формы, размеров, цвета и типа частицы), а также отбор потенциальных частиц для полимерного анализа [3].

2.2. Обзор загрязнённости арктических морей

Для оценки загрязнения морской среды арктических морей микропластиком было проведено несколько исследований в течение последних 10 лет. Выявлено, что концентрация микропластика в западной Арктике сравнима с Северо-Тихоокеанском регионом и Северной Атлантикой.

Из исследований можно сделать вывод о том, что арктические моря с каждым годом становятся загрязнённые и возможно в скором будущем образование шестого пластикового пятна в западной части.

Микропластик был обнаружен даже в морском льде, и концентрация этих частиц значительно превышает концентрации пластика в окружающей воде и может служить источником вторичного загрязнения при таянии льда.

Основным видом микропластика, загрязняющий данный регион, являются микроволокна. Они имеют небольшой диаметр ~ 10 мкм и менее, длину от 0.5 до 2.0 см.

Также были обнаружены, в небольшом количестве, фрагменты или кусочки микропластика, которые возникают в результате разрушения более крупных пластиковых предметов и имеют размер в диапазоне от 1 мкм до 5 мм. Это означает, что родиной этого микропластика являются сточные воды и ливневый сток.

По данным двух экспедиций (экспедиция ТРАНСАРКТИКА-2019 и исследования [5]), рассматриваемых в данной работе, западная часть арктических морей сильно загрязнена, восточная часть также имеет высокие показатели, правда в загрязнённости плавучего пластика [5]. Центральный район Арктики остается практически свободным от антропогенных загрязнителей.

В районе архипелага Новая Земля вдоль западной границы острова содержание микрочастиц составляло от 7 до 15 шт./м³, однако на северной оконечности архипелага у мыса Желания микрочастицы в «подповерхностном» слое воды обнаруживались лишь в незначительном количестве (3 - 4 шт./м³) [3].

В экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 были обработаны пробы 16 станций. Найдены микрочастицы разных форм, размеров и цветов, среди которых можно выделить наиболее часто встречающиеся нитевидные прозрачные волокна, присутствовавшие в каждой из проб (как и говорилось ранее). Микропластиковых частиц в Баренцевом море в поверхностном слое содержится от 0.7 до 28 шт./м³, в среднем – 8 шт./м³. Для этого же моря характерно большое разнообразие цветов и форм частиц, которые варьируются

от 100 до 2000 мкм. Высокое содержание и большое разнообразие частиц объясняется высокой транспортной нагрузкой в данном районе, а также приносом загрязняющих веществ из Норвежского моря Нордкапским течением.

Содержание частиц в Карском море варьируется от 1 до 4 шт./м³, в среднем 2.5 шт./м³ [3].

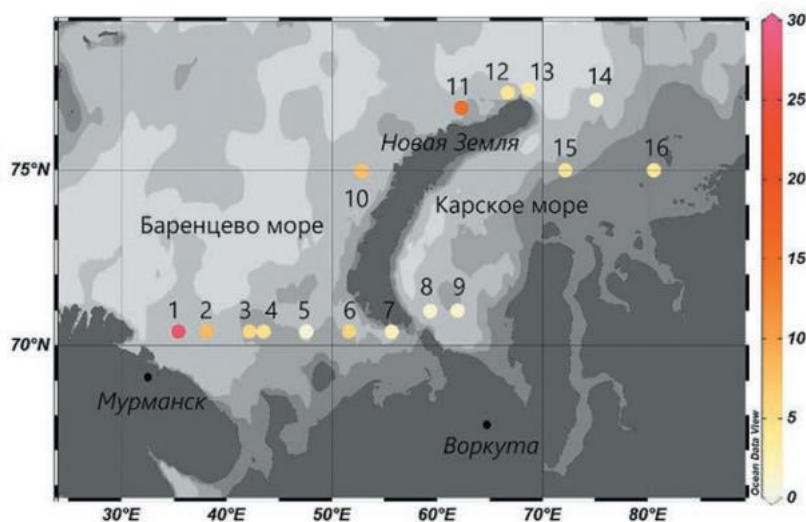


Рис.2.1. Содержание антропогенных (и микропластиковых частиц), шт./м³ в подповерхностном слое (4,5 м) в Баренцевом и Карском морях [3]

По данному разрезу (рис.2.1.) видно, что самое большое количество содержится в западной части Баренцева моря вблизи порта Мурманск (28 шт./м³). С запада на восток на разрезе наблюдается уменьшение содержания микропластика, где в середине разреза на станциях 3, 4 снижается до 10 шт./м³ и далее на станциях 5-7 микропластик практически отсутствует. В Карском море микропластик также практически отсутствует (от 0 до 2 шт./м³) на станциях 8 и 9, соответственно. Это означает, что влияния атлантических вод в этой части моря нет и архипелаг Новая Земля является барьером в распространении загрязнителей с поверхностными течениями из Северной Атлантики. Однако, повышение концентраций микрочастиц в районе плюмов сибирских рек — с 1 до 4 шт./м³ (станции 15 и 16) может быть связано с выносом частиц (в частности, волокон) с речным стоком.

Вдоль западной границы архипелага Новая Земля содержание микрочастиц составляло 7-15 шт./м³. Но уже на севере острова у мыса Желания

микрочастицы в «подповерхностном» слое воды обнаруживались в незначительном количестве (3—4 шт./м³).

Распределение микрочастиц по форме для Баренцева и Карского морей различается незначительно. Для Баренцева моря практически 60% составляют фрагменты неправильных форм (отсутствие микрогранул), и 40% составляют полимерные или целлюлозные с пигментом волокна. В Карском море процентное соотношение поделено поровну.

Значительный вклад в общее содержание антропогенных частиц вносят микроволокна с определенным пигментом, что позволило отнести их к категории «антропогенные волокна» (например, вискоза).

В работе представлены результаты исследований [5] 60 проб воды подземных насосов и 48 проб поверхностных нейстонных сетей. Всего в пробах поверхностных вод было собрано 258 частиц, но только 41 частица была идентифицирована как пластик (15.9%). В Баренцевом, Карском и Восточно-Сибирском морях найдены три более крупных пластиковых фрагмента (длиной 10–30 мм), но не учитывались в дальнейших анализах.

Средний размер микропластика для всего района исследований составил 2.5 ± 1.5 мм, варьируя от 0.2 мм в море Лаптевых до 5.0 мм в Баренцевом море. Средняя площадь поверхности частиц составила 3.2 ± 4.1 мм² от 1.2 ± 2.1 мм² в море Лаптевых до 6.1 ± 6.6 мм² в Баренцевом море.

Микропластик был обнаружен на 12 из 48 станций (25%), начиная от 0 до 10 частиц на образец. Было обнаружено в среднем 0.004 шт./м³ микропластика в поверхностных образцах и 0.8 шт./м³ в подповерхностных образцах.

Численность плавающего микропластика варьировалась от 0 до 0.045 шт./м³ (0–9000 шт./км²) и в среднем от 0.004 до 0.009 шт./м³ (800 ± 2000 шт./км²). Среди исследованных морей наименьшее содержание микропластика было в море Лаптевых (0.002 шт./м³), а в Восточно-Сибирском — самое высокое (0.010 шт./м³).

Средняя массовая концентрация микропластика составила 3.7 ± 11.5 мкг/м³, (диапазон 0–71 мкг/м³). Наибольшие массовые концентрации

микропластика наблюдались в Баренцевом море (12.5 мкг/м^3), тогда как в остальных морях они были на 1–2 порядка ниже ($0.4\text{--}1.1 \text{ мкг/м}^3$). Это говорит о том, что микропластик Атлантического происхождения имеет наибольшую массовую концентрацию [5].

Согласно существующим представлениям, основной вклад загрязнения Баренцева моря вносят атлантические воды, а в Карском море могут являться крупнейшие сибирские реки, что будет рассмотрено ниже. Как было установлено [5], что высокое содержание частиц в приповерхностном слое наблюдалось только в солёных водах и практически отсутствовало в речных шлейфах, особенно в их слабоминерализованной внутренней части.

В Карском море микропластик с площадью поверхности менее 3 мм^2 преобладал во внутреннем плюме с низким содержанием солей. А во внешнем плюме микропластик имел более крупные размеры с площадью поверхности до 10 мм^2 . Также плумы характеризовались наибольшим обилием волокон и отсутствием фрагментов.

Наибольшее разнообразие типов полимеров было обнаружено во внешнем плюме (пять типов полимеров, 13% волокон) по сравнению с внутренним плюме (три типа полимеров, 67% волокна).

В подповерхностном слое, также был обнаружен микропластик (в 50 из 60 проб). Он состоял из 55% волокон и 45% фрагментов. Всего во время визуальной идентификации было выделено 665 частиц, и только 111 (16.7 %) были подтверждены с помощью FT-IR, что соответствует от 0 до 7 частиц на образец. Размер микропластика колебался от 0.1 до 3.6 мм, в среднем $0.7 \text{ мм} \pm 0.7 \text{ мм}$. Площадь поверхности микропластика варьировала от 0.0001 до 0.7 мм^2 , в среднем $0.04 \pm 0.09 \text{ мм}^2$. [5]

Обилие микропластика в подповерхностных пробах варьировало от 0 до 2.4 шт./м^3 при среднем значении $0.8 \pm 0.6 \text{ шт./м}^3$. Были найдены значимые различия в морфологии микропластика (фрагменты и волокна). В морях Лаптевых и Восточно-Сибирском отмечено наибольшее обилие волокна (0.5 шт./м^3 и 0.6 шт./м^3 , соответственно) и наименьшее обилие обломков

(0.2 шт./м³ в обоих морях). Наибольшее обилие обломков отмечено в Карском море (0.7 шт./м³). Отчетливые различия также наблюдались в отношении площади микропластика - средняя площадь поверхности микропластика в Баренцевом море (0.2 мм²) была на порядок больше, чем в других морях (0.01–0.03 мм²). [5]

В результате подповерхностный микропластик, попадающий в Северный Ледовитый океан из Северной Атлантики, можно статистически отличить от выбрасываемого из рек Оби, Енисея и Лены. В этих водных массах примерно одинаковое содержание микропластика (0.8–1.0 шт./м³), а весовая концентрация микропластика отличается на порядок (3.8 мкг/м³ и 0.3 мкг/м³ для атлантической поверхностной водной массы и речного плюма, соответственно). Подповерхностный микропластик в полярной водной массе имел сходную морфологию, типы полимеров и обилие элементов с обнаруженными в атлантической поверхностной водной массе [5].

Плавающий микропластик, привнесённый из Северной Атлантики, зарегистрирован только в западной части района исследований и состоит в основном из полиэтилена. Речной плавучий микропластик состоит в основном из полиэфирных волокон и накапливается во внутреннем плюме, прилегающих к эстуариям и дельтам рек Оби, Енисея и Лены. Реки Обь, Енисей и Лена впадают в южные части Карского моря и морей Лаптевых и несут речной пластик, собираемый с широких речных водоразделов. Распространение речного микропластика сильно зависит от распространения Обь-Енисейского и Ленского плюмов.

3. Исследования источников поступления микропластика в моря Западной Арктики по данным экспедиционных исследований

В 2019 году была проведена крупнейшая экспедиция по изучению арктических морях ТРАНСАРКТИКА-2019, в которой были собраны и проанализированы пробы, на основе которой предполагается выделить микропластик речного и атлантического происхождения.

Для того, чтобы можно было выделить пластик речного и атлантического происхождения, которые имеют разные физические (размер, морфологию, массу) и химические (тип полимера) характеристики [5], было проанализировано распределение водных масс на акватории Баренцева и Карских морей.

3.1. Распределение водных масс в Баренцевом и Карском морях

В Баренцевом море выделяют 4 водные массы, которые в каждом районе моря могут иметь различные характеристики (рис.3.1):

- атлантическая (тёплая с положительными температурами и высокой солёностью);
- арктическая (с отрицательной температурой и пониженной солёностью);
- прибрежная (с высокой температурой и низкой солёностью летом и с характеристиками арктической водной массы зимой);
- баренцевоморская, образующаяся в самом море под влиянием местных условий, с низкой температурой и высокой солёностью.

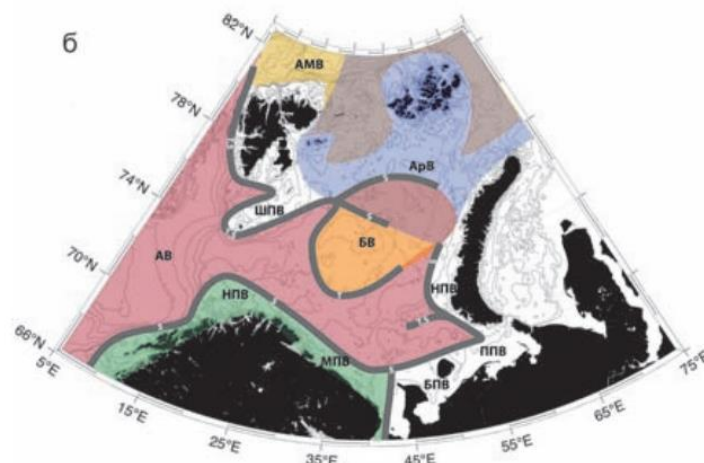


Рис.3.1. Распределение водных масс Баренцева моря. АВ-атлантические воды, БВ-баренцевоморские воды, ПВ-прибрежные воды, НПВ-норвежские, МПВ-мурманские, БПВ-беломорские, ППВ-печорские [9]

На разрезе в Баренцевом море проявляется влияние теплой солёной атлантической воды (Нордкапское течение). Однако к проливу Карские ворота видно, что влияние на изменение гидрологических характеристик оказывают прибрежные воды (Беломорская и Печорская).

Атлантическая вода (АВ) – это тёплая солёная водная масса, приходящая из Атлантического океана, которая преобладает в западной и юго-западной частях Баренцева моря. АВ всегда имеет положительную температуру 3-5°C зимой, 8-10°C летом; с глубиной температура понижается, но в течение всего года остается положительной, не опускаясь ниже 3°C на горизонтах до 200 м. В поверхностном слое значения солёности составляет 34.5-35.0 епс [9].

В прибрежных районах можно выделить пять водных масс, главные особенности которых заключаются в сильно пониженной солёности и значительной сезонной изменчивости температуры воды. Это – норвежская, мурманская, беломорская, печорская и новоземельская водные массы [10].

Рассмотрим 3 прибрежные водные массы, которые касаются нашего района исследования.

Беломорская водная масса образуется в результате водообмена с Белым морем и её трансформации под действием приливного перемешивания в слое 0-40 м. Она распространяется к северу и востоку в виде потока шириной от

50 км зимой до 100-150 км летом. Солёность беломорских вод изменяется от 31 до 34.7 епс, температура T от -1.8°C до $+8^{\circ}\text{C}$.

Крайний юго-восток Баренцева моря занимают прибрежные печорские воды, образованные стоком р. Печоры. Эти воды имеют солёность от 30 епс до 34.5 епс, температура воды изменяется в таком же диапазоне, что и Беломорские воды. Печорские воды распространяются только в поверхностном слое. Ниже, на глубине от 10 до 20 м, сохраняются гидрологические условия, свойственные беломорской водной массе [10].

Новоземельская прибрежная вода: зимние значения её солёности равны 34.0-34.5 епс, а летние ниже и более изменчивы, т.к. на них отражается поступление вод с пониженной солёностью через пр. Карские Ворота. В июле-августе солёность в районе пролива Карские Ворота снижается до 28-30 епс. Температура воды в Новоземельской водной массе на поверхности также ниже ($5-6^{\circ}\text{C}$), чем на той же широте к западу от них ($7-8^{\circ}\text{C}$) [9].

В Карском море выделяют три водных массы. Две водные массы остаются постоянными на протяжении всего года Арктическая водная масса и атлантические воды (или баренцевоморские), а в летний период из-за речного стока появляется ещё одна водная масса. Так как время исследования август-сентябрь, то мы имеем дело как раз с тремя водными массами. И можем видеть на рисунке какой вклад она вносит на изменение гидрологических характеристик. (рис. 3.2)

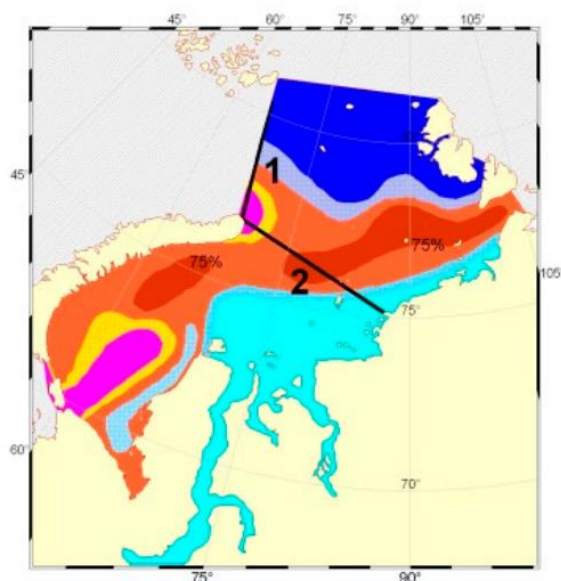


Рис. 3.2. Условные границы водных масс Карского моря в летний период. Оранжевая-Арктическая водная масса, розовая-баренцевоморские воды, голубая-речные воды

Воды Арктического бассейна приходящая из высоких широт Северного Ледовитого океана имеют температуру летом -1.3°C и солёность 22 епс.

Атлантическая вода проникает по желобам Св. Анны и Воронина и затем распространяющаяся в придонном слое обладает температурой равной 2.3°C и солёностью равной 35 епс. Атлантическая водная масса, в отличие от всех остальных масс, характерных для данного региона, во все сезоны имеет положительную температуру и предоставляет приток тепла в Карское море.

Речная модифицированная летняя вода, образующаяся в основном со стока Оби и Енисея ($T = 7^{\circ}\text{C}$, $S = 24.5$ епс), формирующаяся в юго-западной половине моря.

В Северный Ледовитый океан поступает значительный материковый сток, составляющий более 11% суммарного мирового стока в океан. Линза Карского моря является одной из крупнейших опресненной водной массой Арктики, так как Обь и Енисей входят в 20 крупнейших по стоку рек впадающих в прибрежные воды. Енисей имеет сток 650 км^3 . Обь – 510 км^3 . Пресноводный сток Енисея является крупнейшим среди всех арктических тек и составляет 20% от общего стока пресной воды в Северный Ледовитый океан [5].

В период наблюдений (в августе 2019 года) расход реки Оби составлял 22100 м³/с. (58км³). Так как данные на период исследования по Енисею отсутствуют, то расход в августе принимался согласно данным многолетним наблюдений [13] 20000 м³/с - 53 км³ [13].

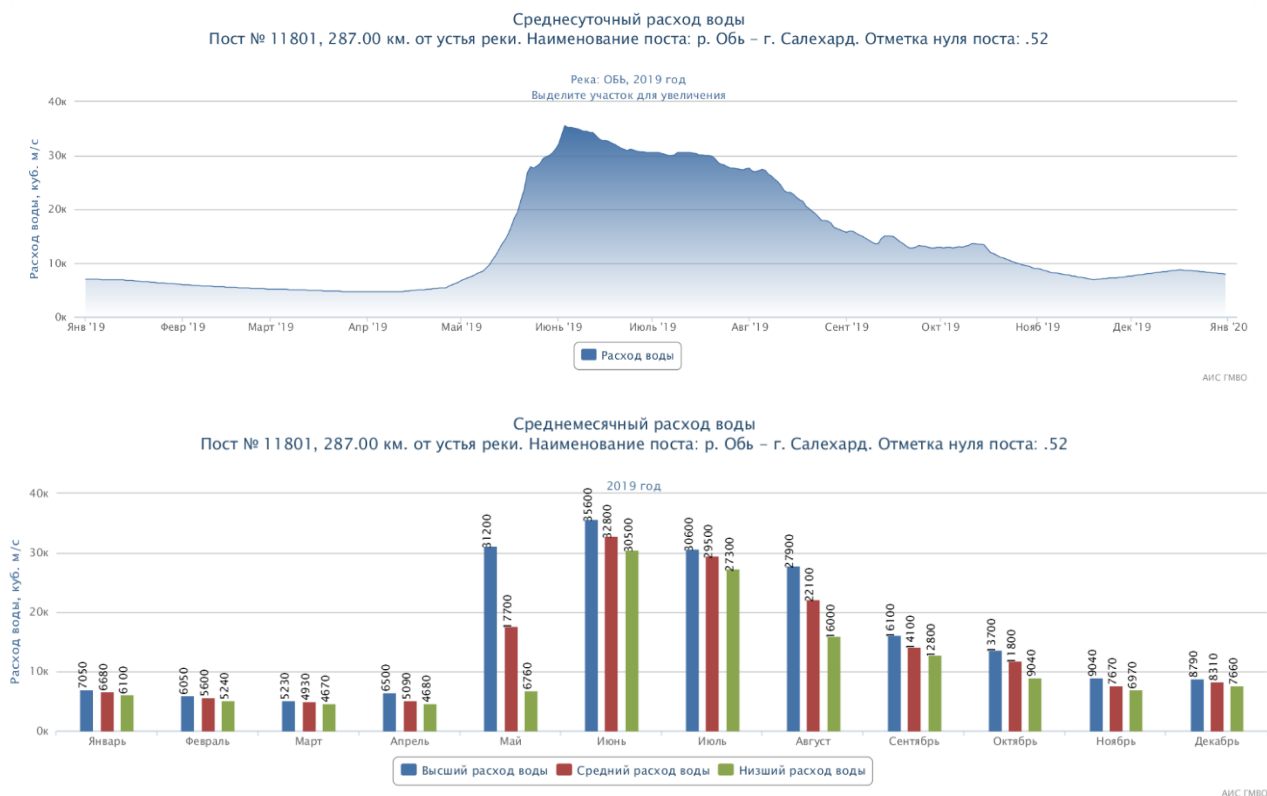


Рис. 3.3. Среднесуточный (а) и среднемесячный (б) расход воды реки Обь [12]

Из-за того, что устья Обской губы и Енисейского залива расположены на расстоянии около 150 км, плум Оби-Енисея формируется в приэстуарных акваториях и затем сливаются в единый плум Оби-Енисея. Более 70% речного стока в Карское море поступает из Обской губы и Енисейского залива с июня по сентябрь. Этот объем воды смешивается с морскими водами в результате чего формируется опресненная линза площадью в сотни квадратных километров [11].

В силу своих значительных размеров эти большие поверхностные опресненные водные массы оказывают существенное влияние на гидрологические характеристики и антропогенное загрязнение.

3.2. Анализ водных масс Баренцева и Карского морей в период исследования

Тёплые и солёные АВ впадают в южную часть Баренцева моря из Норвежского моря в виде Нордкапского течения. Как видно из разреза, температура на поверхности составляет в западной части от 9°C до 10°C, солёность равна 34.2-34.6 епс, что свойственно для АВ в летний период (рис. 3.4. – 3.5.). К востоку АВ трансформируется, становится менее солёной и тёплой за счёт влияния вод из Карского моря и прибрежных водных масс.

Воды Беломорского течения выносятся из Баренцева моря в Карское через южную часть пролива Карские Ворота, а воды Карского моря поступают в Баренцево через северную часть этого пролива с течением Литке. Последнее переносит холодные и пресные воды на северо-запад.

На востоке разреза видно падение температуры. Наблюдается преобладание Беломорского и Печорского течений. Эти воды менее солёные, чем у Горла Белого моря из-за добавления в систему этого течения вод реки Печоры. А также новоземельские воды оказывают влияние на гидрологические характеристики, которые формируются под воздействием течений из Карского моря. Итак, температура в восточном районе разреза составляет уже от 7°C до 8°C, солёность – от 30.2 до 32 епс (рис. 3.4. – 3.5.).

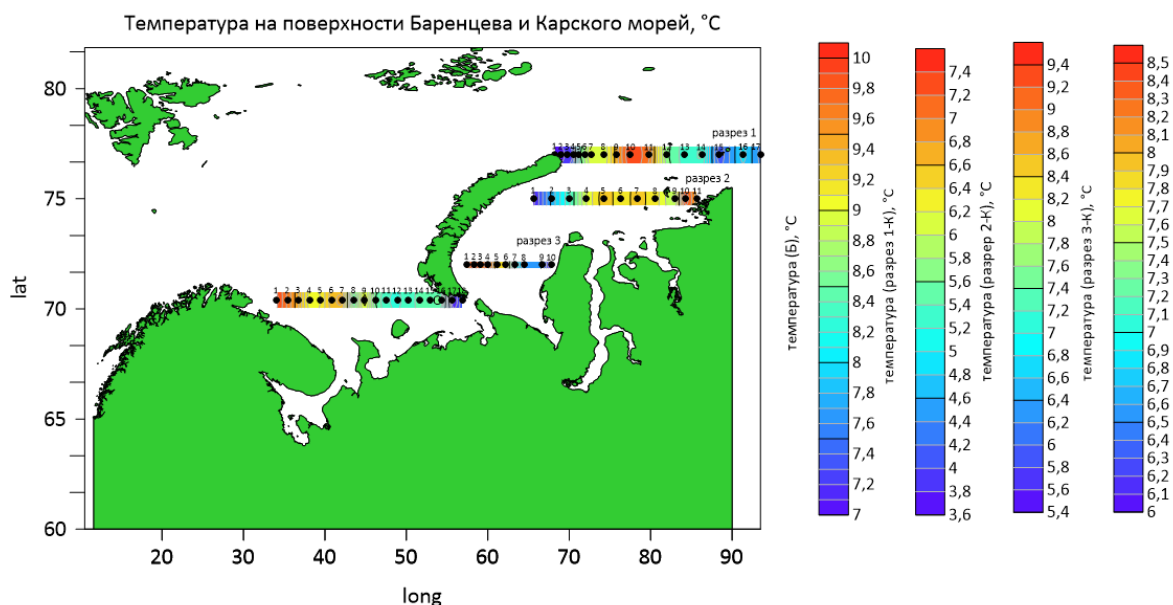


Рис.3.4. Карта распределения температуры на разрезах на поверхности

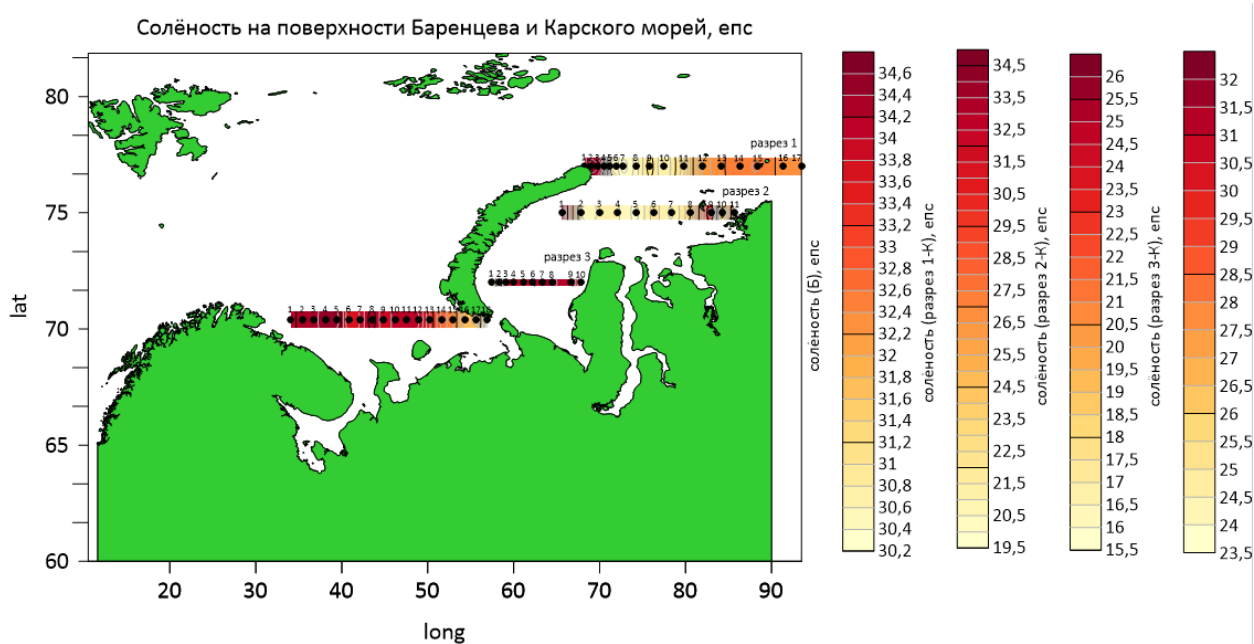


Рис.3.5. Карта распределения солёности на разрезах на поверхности

Также для более точного разделения границ водных масс, были построены вертикальные профили температуры и солёности (рис.3.6-3.9). На разрезе можно заметить изменения от 1 станции до 18 (с запада на восток). До станции 14 наблюдаются тёплые и солёные воды, что, как и говорилось ранее, свойственно для атлантических вод. А вот западнее, к концу разреза (к 18 станции), наблюдается сильное падение температуры и солёности (с 10°C до 6°C, и с 34.4 епс до 30.2 епс), что подтверждает влияния прибрежных масс.

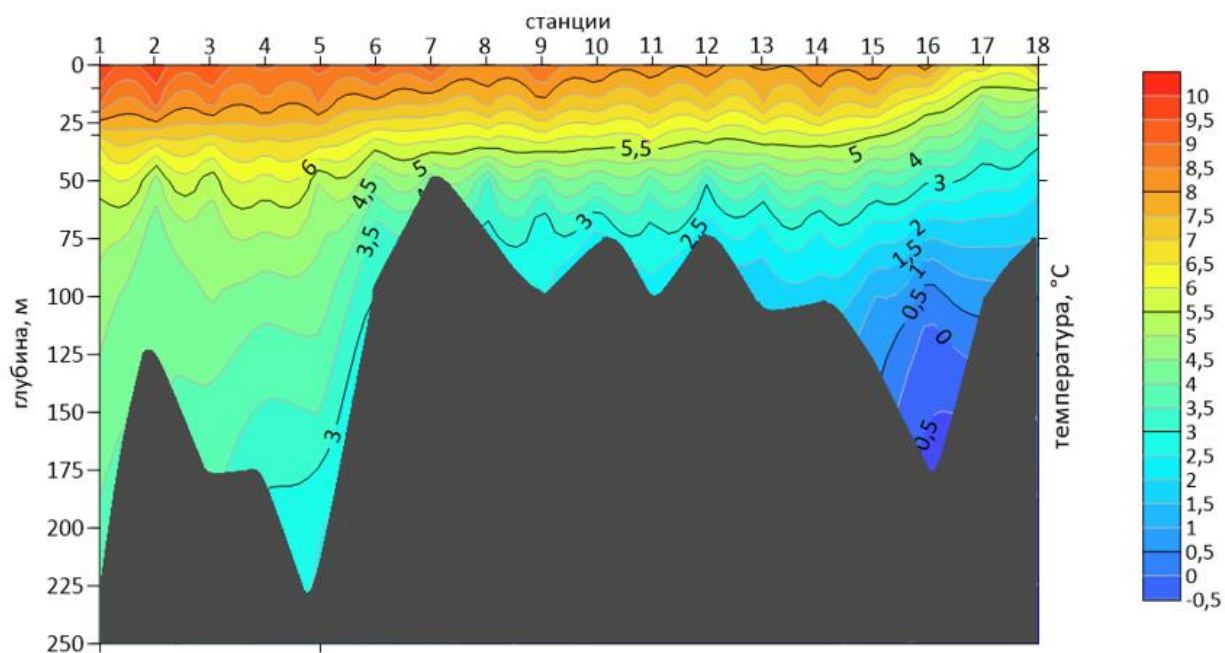


Рис. 3.6. Изменение температуры с глубиной в Баренцевом море

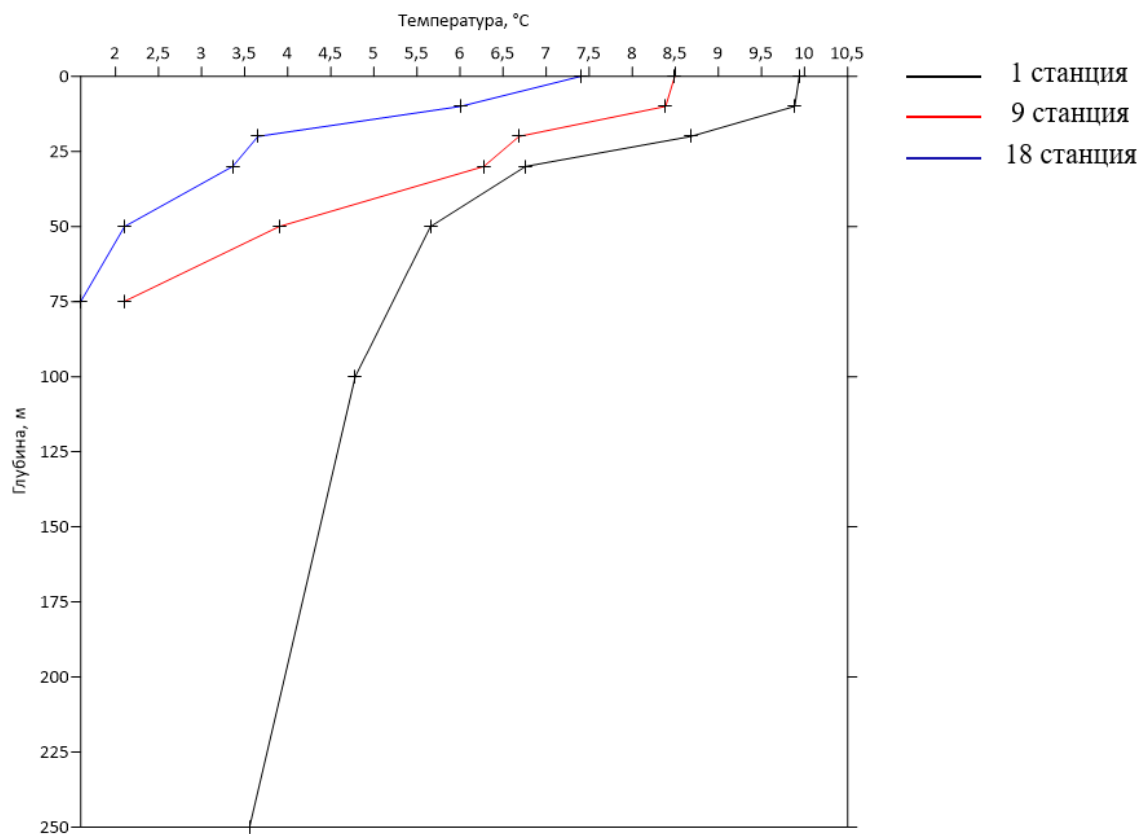


Рис. 3.7. Изменение температуры с глубиной в Баренцевом море на 3 станциях:
1, 9 и 18

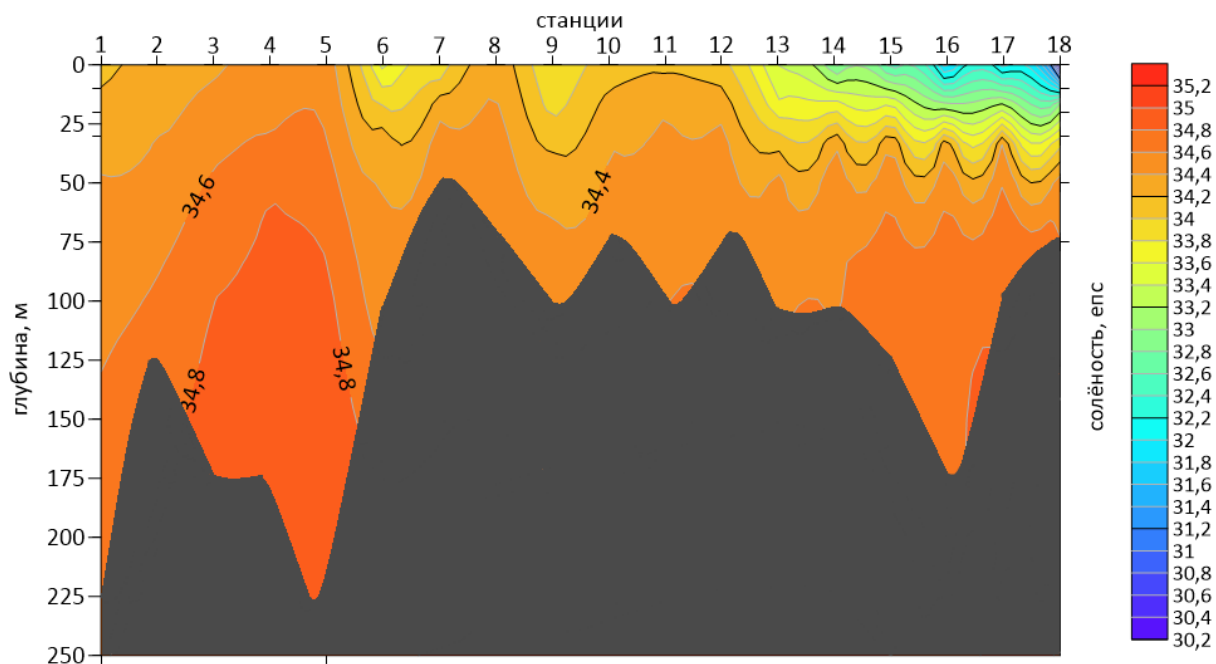


Рис. 3.8. Изменение солёности с глубиной в Баренцевом море

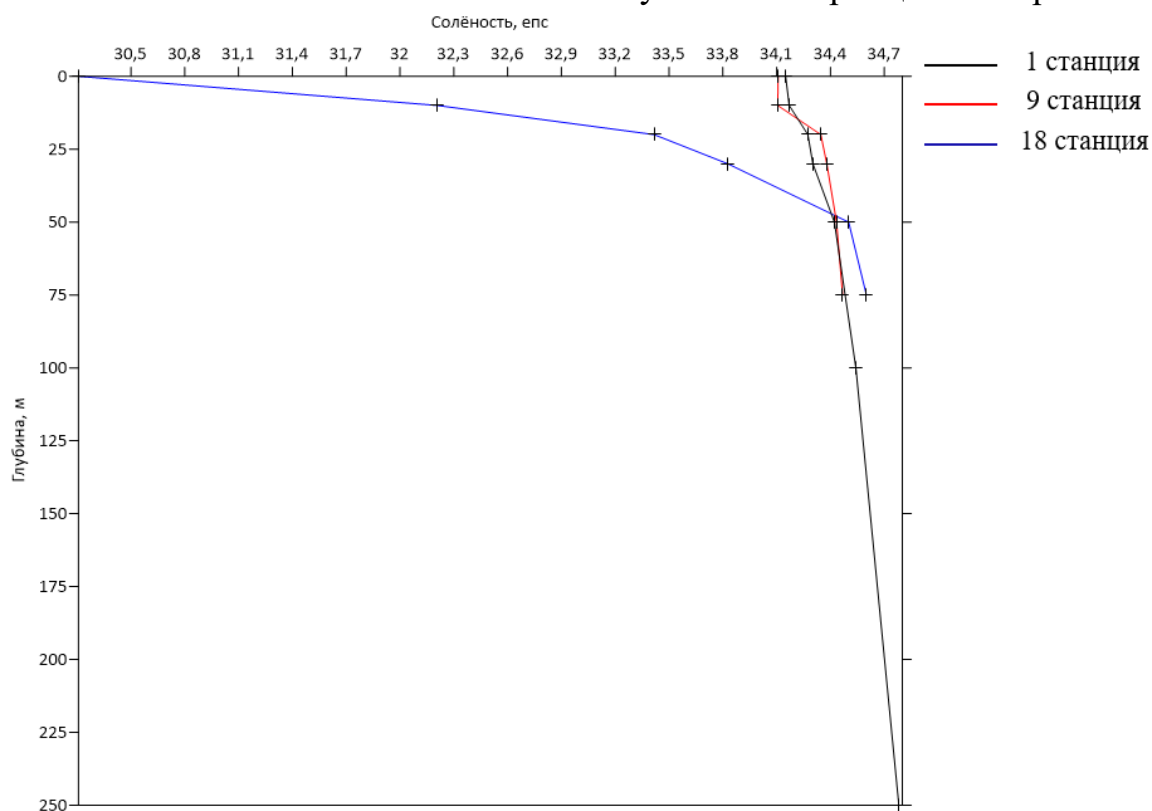


Рис. 3.9. Изменение солёности с глубиной в Баренцевом море на
3 станциях: 1, 9 и 18

На разрезах Карского моря, как видно из рисунков 3.10-3.13, речной сток оказывает большое влияние на 1 и 2 разрезы.

Второй разрез сильнее подвержен влиянию речного стока по сравнению с первым разрезом. На центральной части 2 разреза расположен опресненный поверхностный слой - Обь-Енисейский плюм. Поэтому солёность равна от 15.5 до 18 епс (рис. 3.10 и 3.12), температура от 8°C до 8.4°C (рис. 3.11 и 3.13), такие характеристики присущи речной водной массе (но как отмечалось ранее, что в плюме солёностью до 15 епс, измерения проводились в основное время в сентябре, и уже северные границы плюма стали смещаться на юг). Видим, что западная часть 2 разреза находится в зоне арктических вод, соответственно, более солёных. Температура равна 5.4-7.5 °C, солёность равна от 23 до 26 епс. Воды восточной части разреза обладают такой же солёностью, что и западные, а вот температура имеет максимальное значение на данном разрезе 9.4 °C.

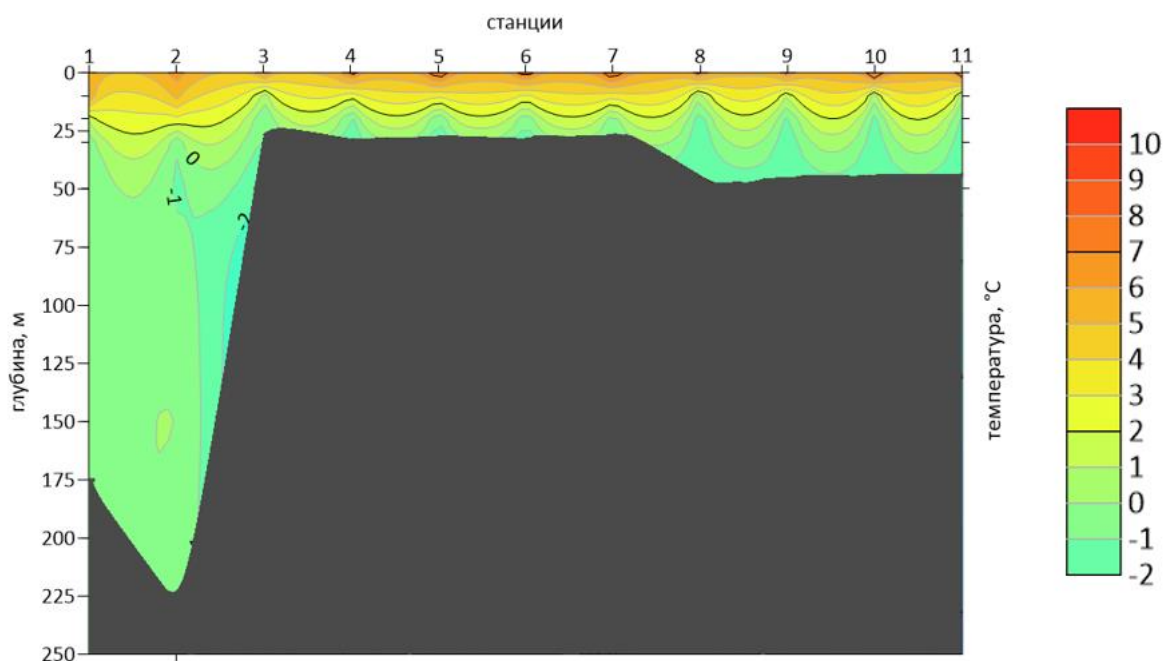


Рис. 3.10. Изменение температуры с глубиной в Карском море (2 разрез)

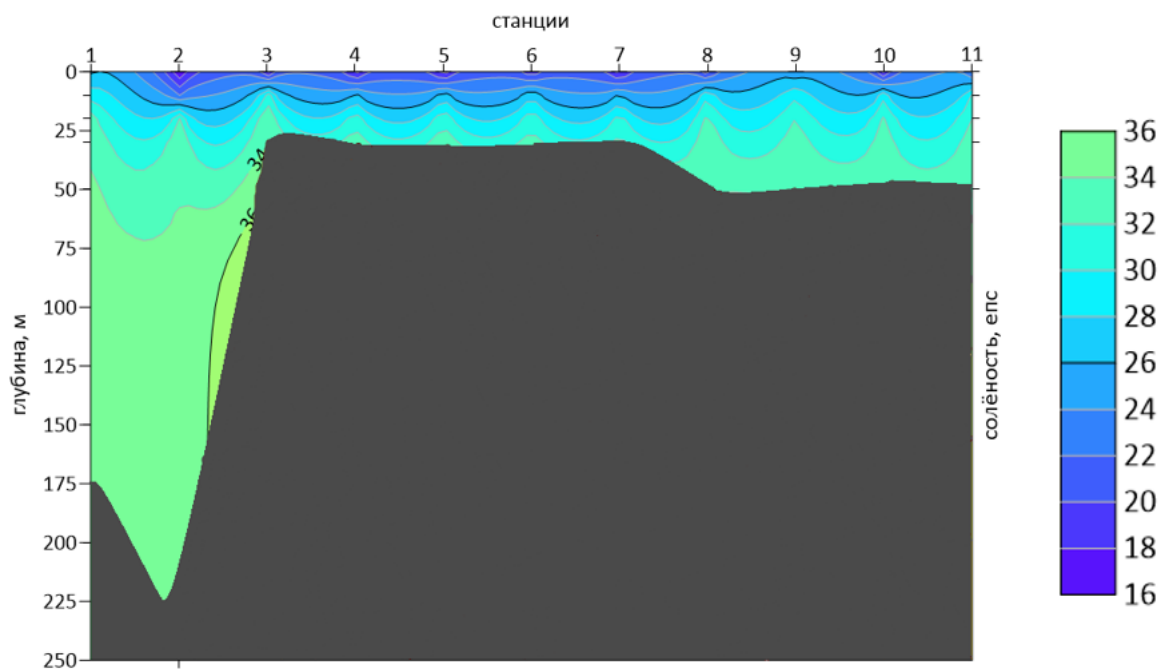


Рис. 3.11. Изменение солёности с глубиной в Карском море (2 разрез)

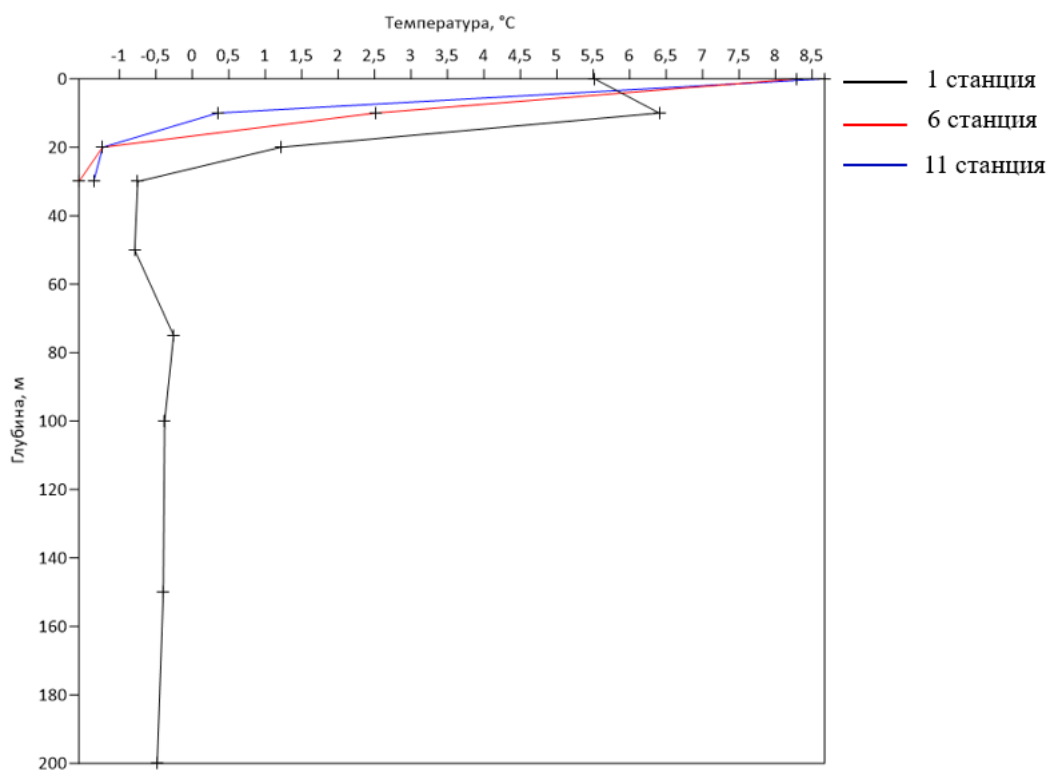


Рис. 3.12. Изменение температуры с глубиной в Карском море (2 разрез)
на 3 станциях: 1, 6 и 11

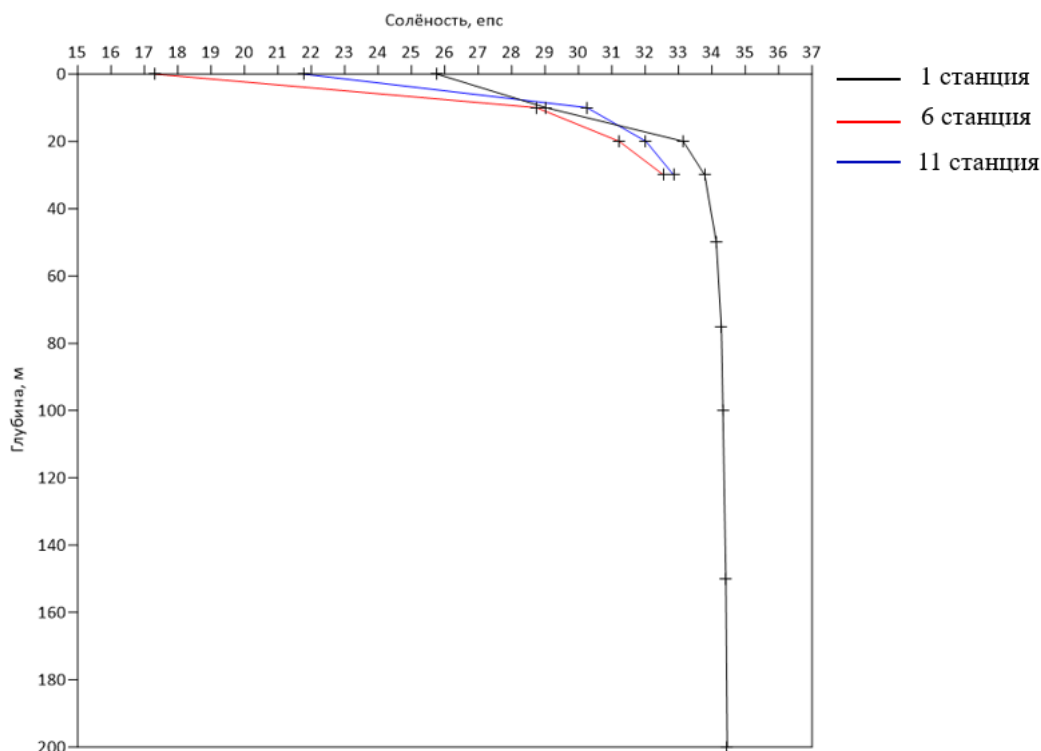


Рис. 3.13. Изменение солёности с глубиной в Карском море (2 разрез) на 3 станциях: 1, 6 и 11

На разрезе 1 распресненная линза распространяется на большое расстояние, достигая и влияя на исследуемый район. Центральная часть имеет солёность 19.5 до 24 епс (рис. 3.15 и 3.17), температуру от 5.5°C до 7.4°C (рис. 3.14 и 3.16), что свойственно для речной водной массы (линзе).

Как видно из рисунка распределения водных масс, то в северную часть Новой земли впадают более солёные Баренцевоморские воды, поэтому в западной части разреза температура составляет 3.6-4.8 °C и солёность уже 32-34.5 епс.

В восточной части разреза температура 3.6-5.2 °C такая же, как и в западной части разреза. Так как воды этой части Карского района – арктические и менее солёные, то видно в сравнении с западной частью, что солёность равна 26-28 епс.

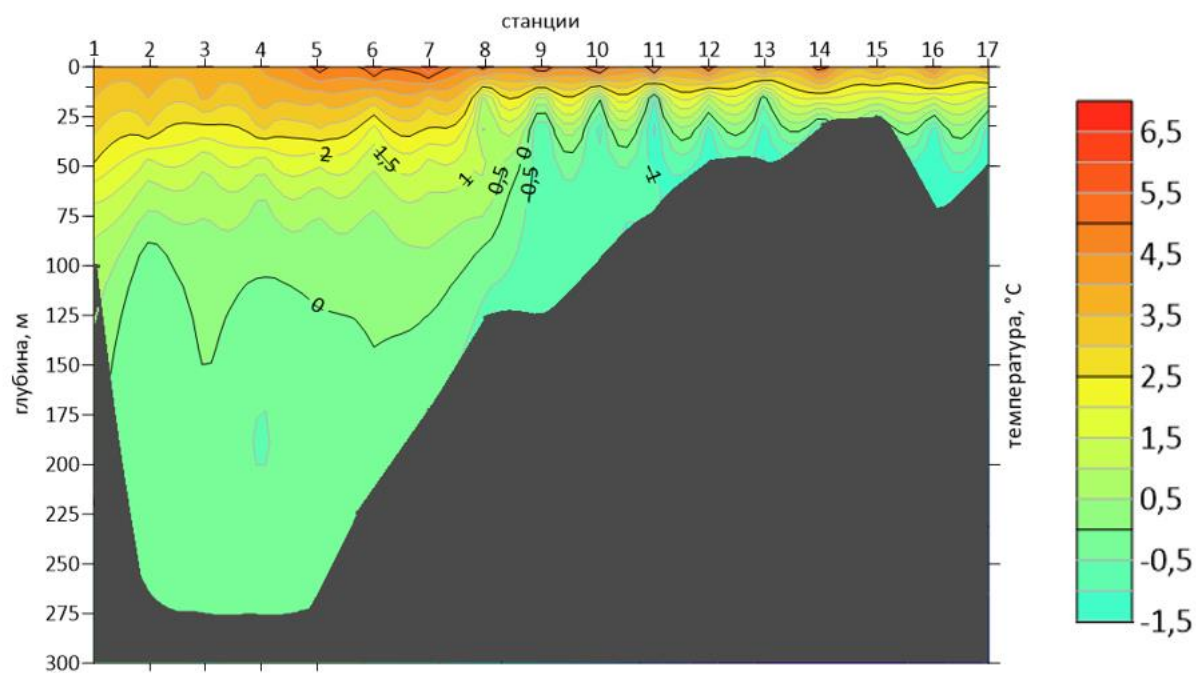


Рис. 3.14. Изменение температуры с глубиной в Карском море (1 разрез)

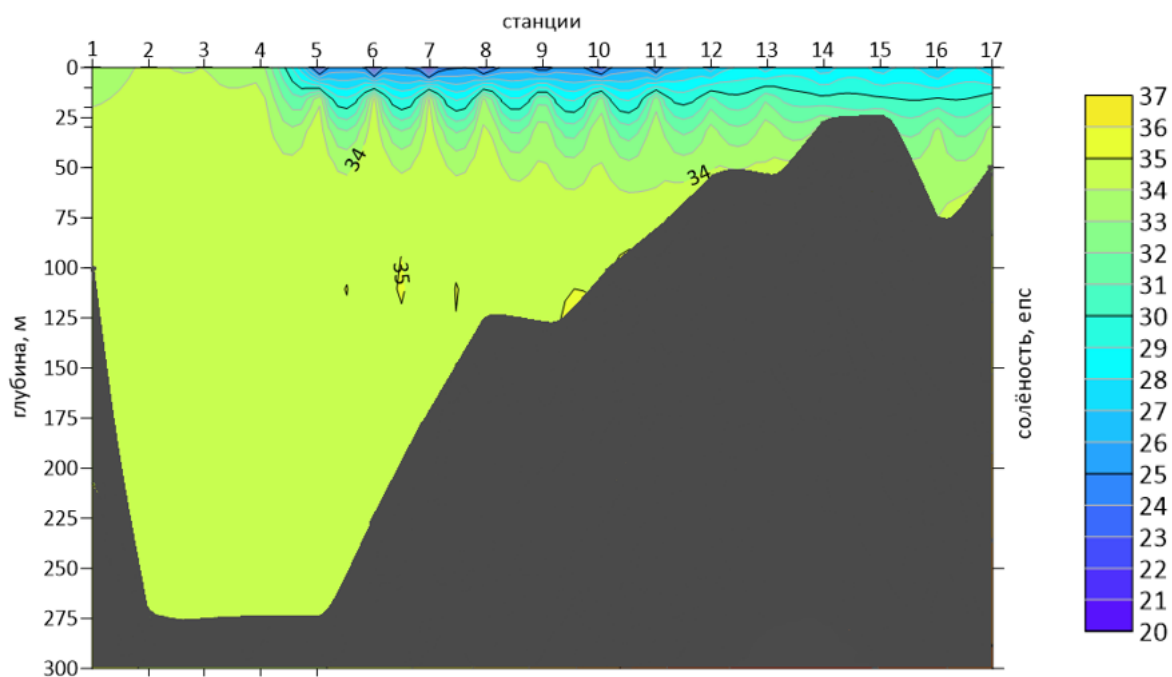


Рис. 3.15. Изменение солёности с глубиной в Карском море (1 разрез)

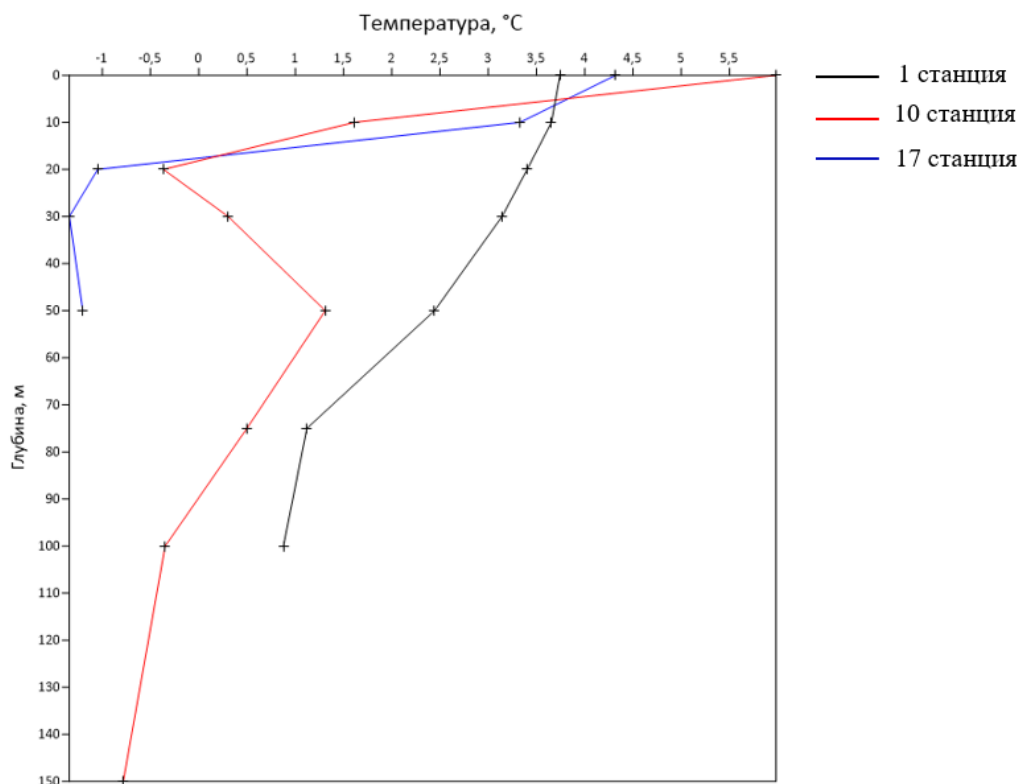


Рис. 3.16. Изменение температуры с глубиной в Карском море (1 разрез) на 3 станциях: 1, 10 и 17

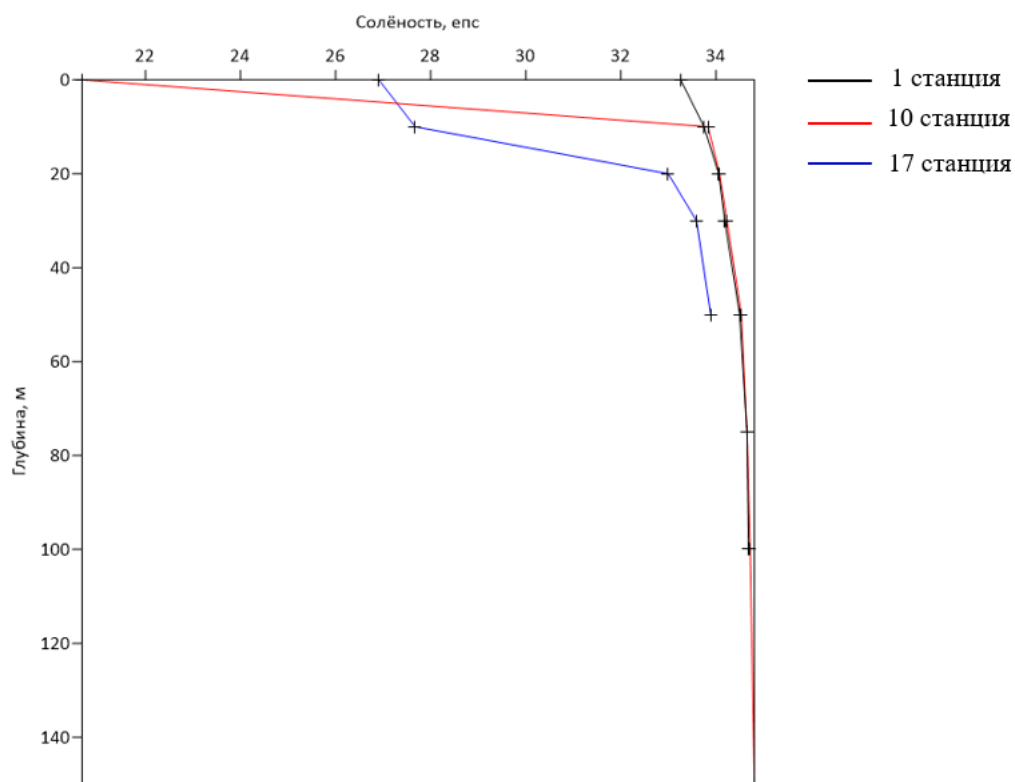


Рис. 3.17. Изменение солёности с глубиной в Карском море (1 разрез) на 3 станциях: 1, 10 и 17

На разрезе 3 Карского моря на станциях отмечаются водные массы с характеристиками Баренцевоморских вод (рис. 3.18 - 3.21). Температура на поверхности практически не меняется из-за циклонического круговорота расположенного в западной части моря и равна 6-6.5°C, солёность равна 31-32 епс.

В западной части разреза наблюдается резкое падение солёности. Это происходит из-за влияния Новоземельского течения, которое обладает свойствами присущи арктической водной массе. Как видно на разрезе только первые станции имеют повышенную температуру равную 8-8.5°C и пониженную солёность 23.5-26 епс.

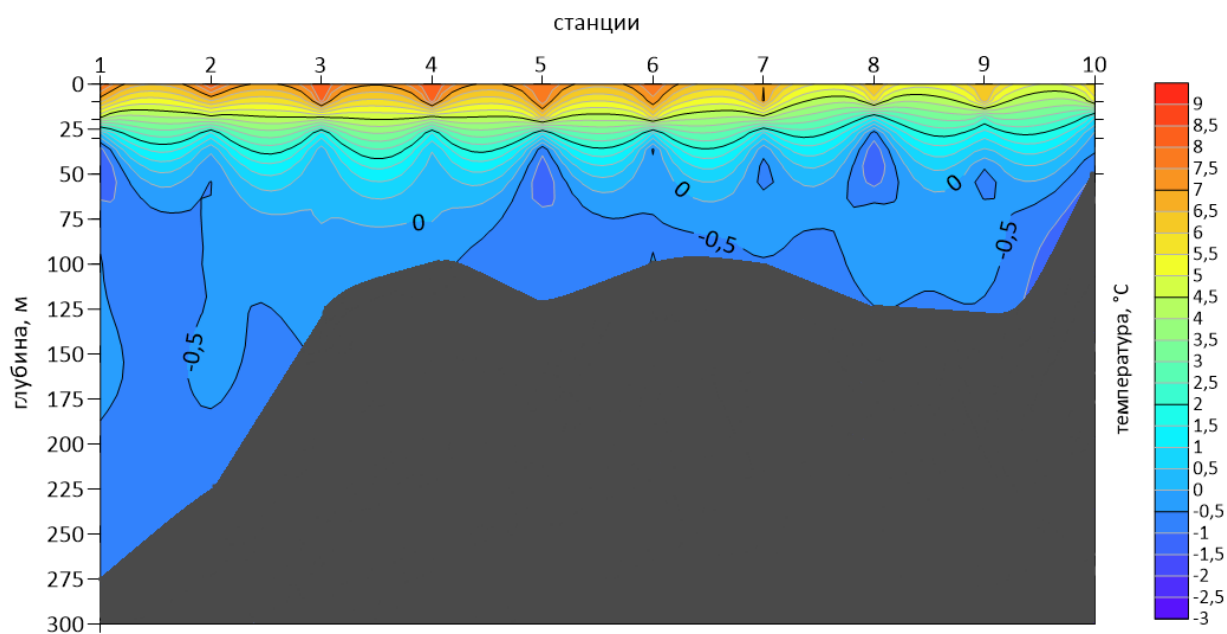


Рис. 3.18. Изменение температуры с глубиной в Карском море (3 разрез)

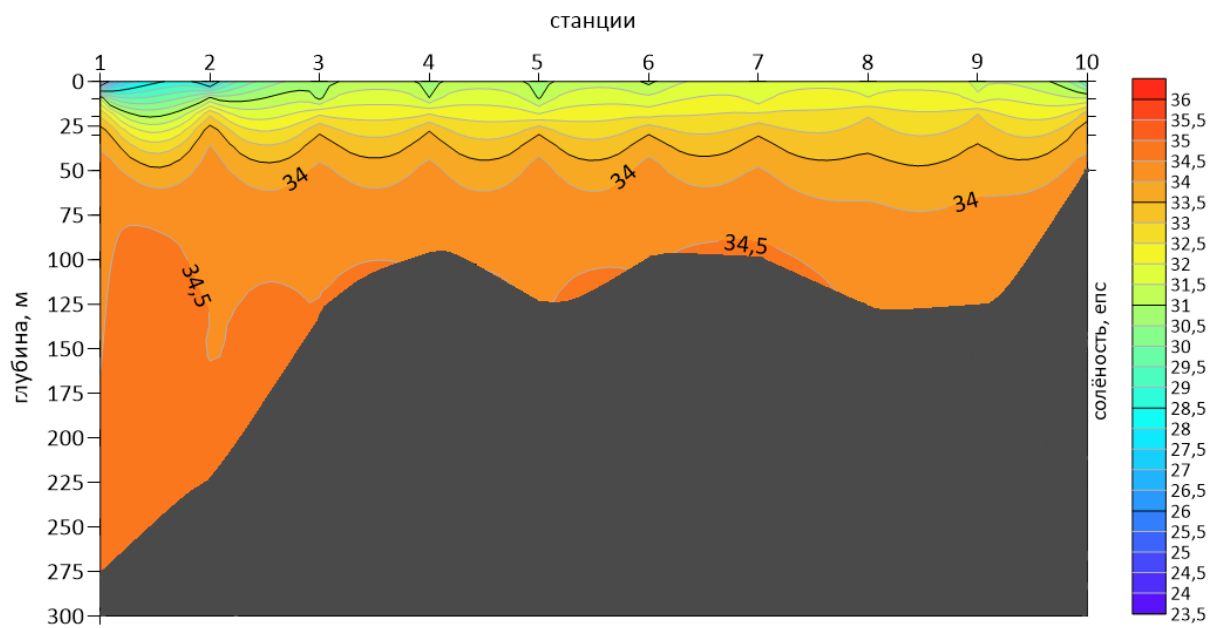


Рис. 3.19. Изменение солёности с глубиной в Карском море (3 разрез)

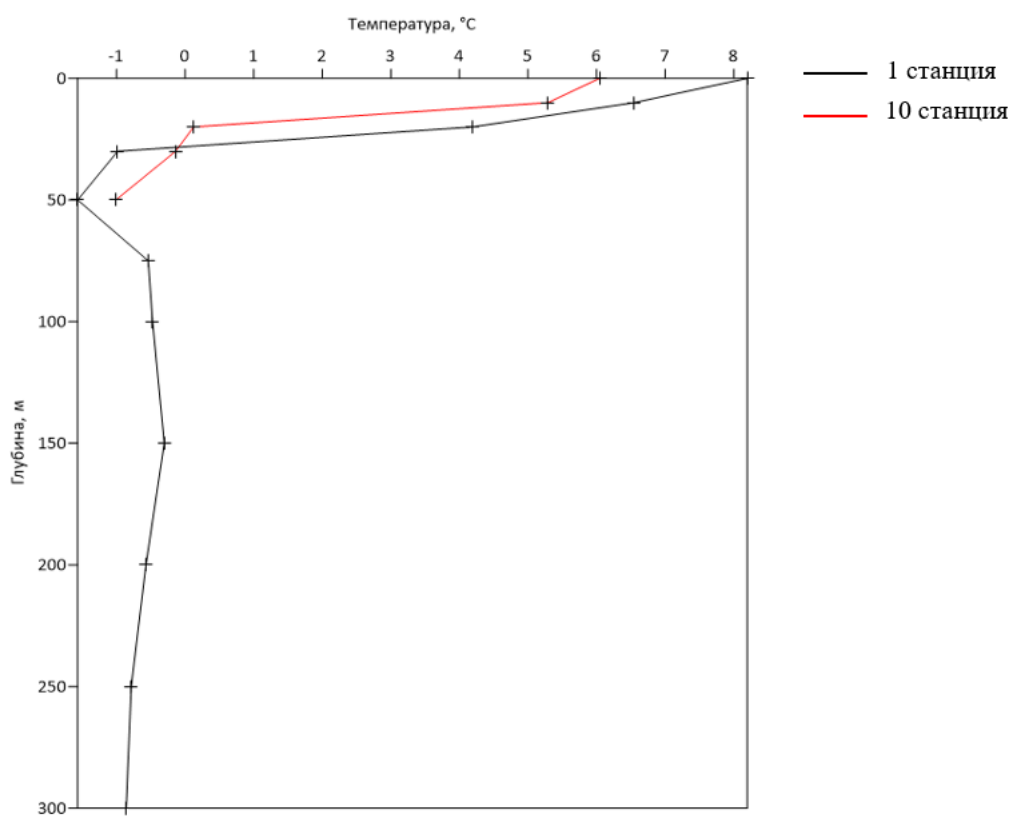


Рис. 3.20. Изменение температуры с глубиной в Карском море (3 разрез) на 2 станциях: 1 и 10

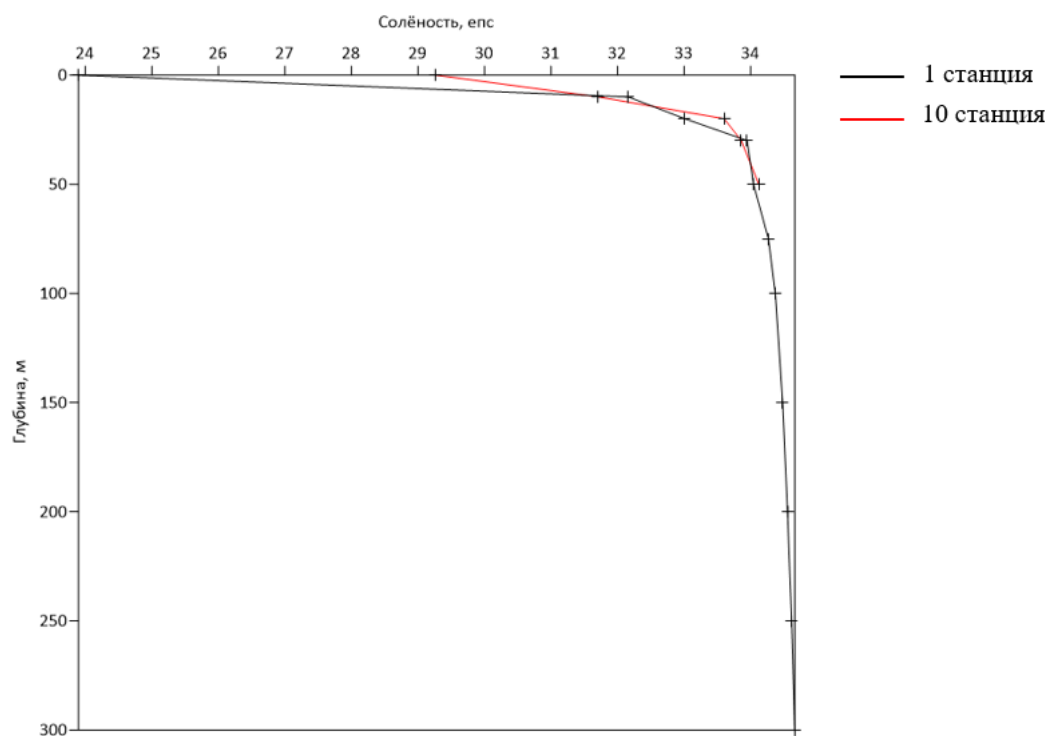


Рис. 3.21. Изменение солёности с глубиной в Карском море (3 разрез) на 2 станциях: 1 и 10

Так как солёность и температура, которая может выравниваться достаточно быстро течениями или ветрами не всегда могут показать чёткие границы, то также одним из важнейших показателей речных вод (плюмов), служит содержание силикатов.

По разрезу (рис. 3.22) видно, что центральные части разреза 1 и 2 Карского моря находятся как раз в этой зоне и хорошо прослеживаются.

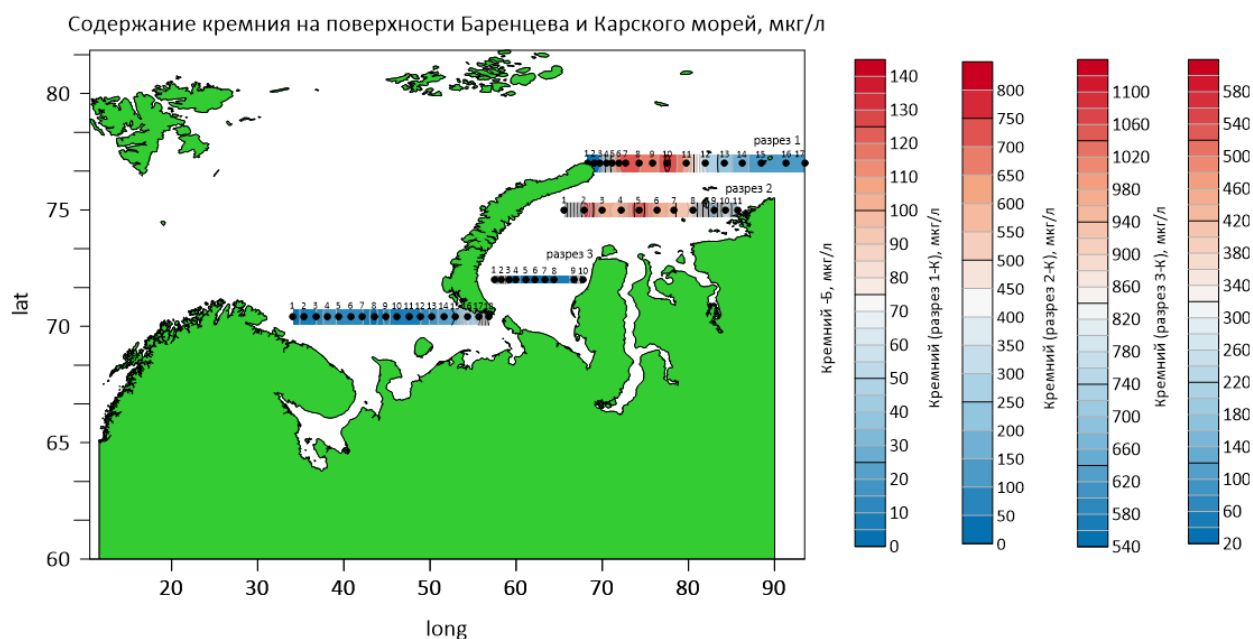


Рис. 3.22. Карта распределения силикатов на разрезах на поверхности

Для уточнения границ водных масс ниже приведены вертикальные профили. Согласно наблюдениям, отмечается высокое содержание силикатов, практически, на всём разрезе 2 (рис. 3.22 – 3.25). Где к западным и восточным точкам концентрации падают с 1000 мкг/л до 300 мкг/л. и также затрагивает центральную часть разреза 1 (от 300 мкг/л до 600 мкг/л), где концентрации также достаточно высокие (границами кремния являются станции 5 и 12), а далее кремний практически отсутствует. Всё это говорит о том, что плюм оказывал сильное влияние в 2019 году.

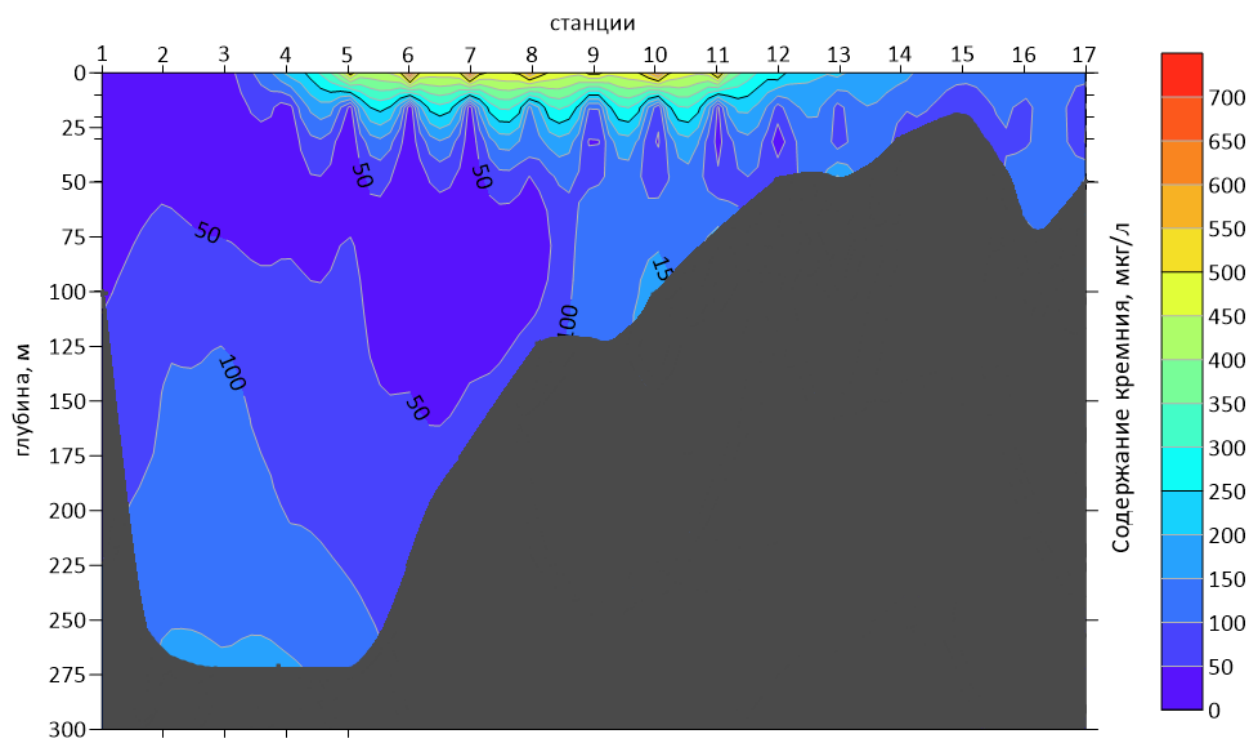


Рис. 3.22. Изменение концентрации силикатов с глубиной в Карском море
(1 разрез)

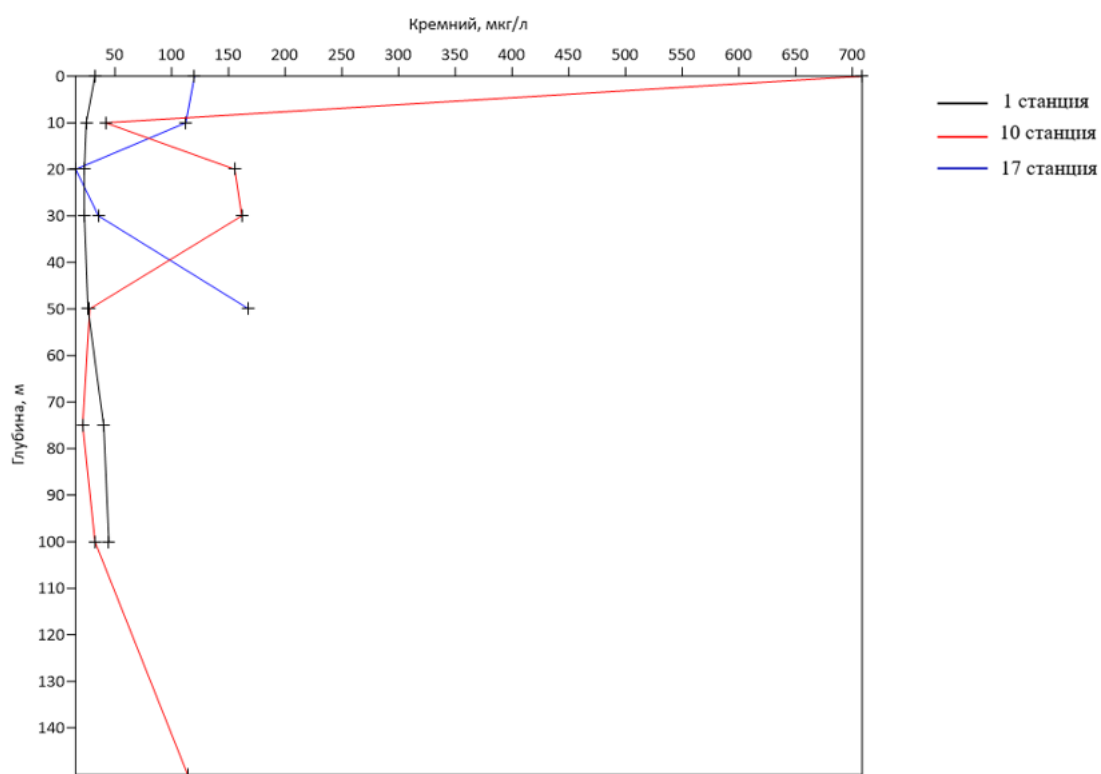


Рис. 3.23. Изменение концентрации силикатов с глубиной в Карском море
(1 разрез) на 3 станциях: 1, 10 и 17

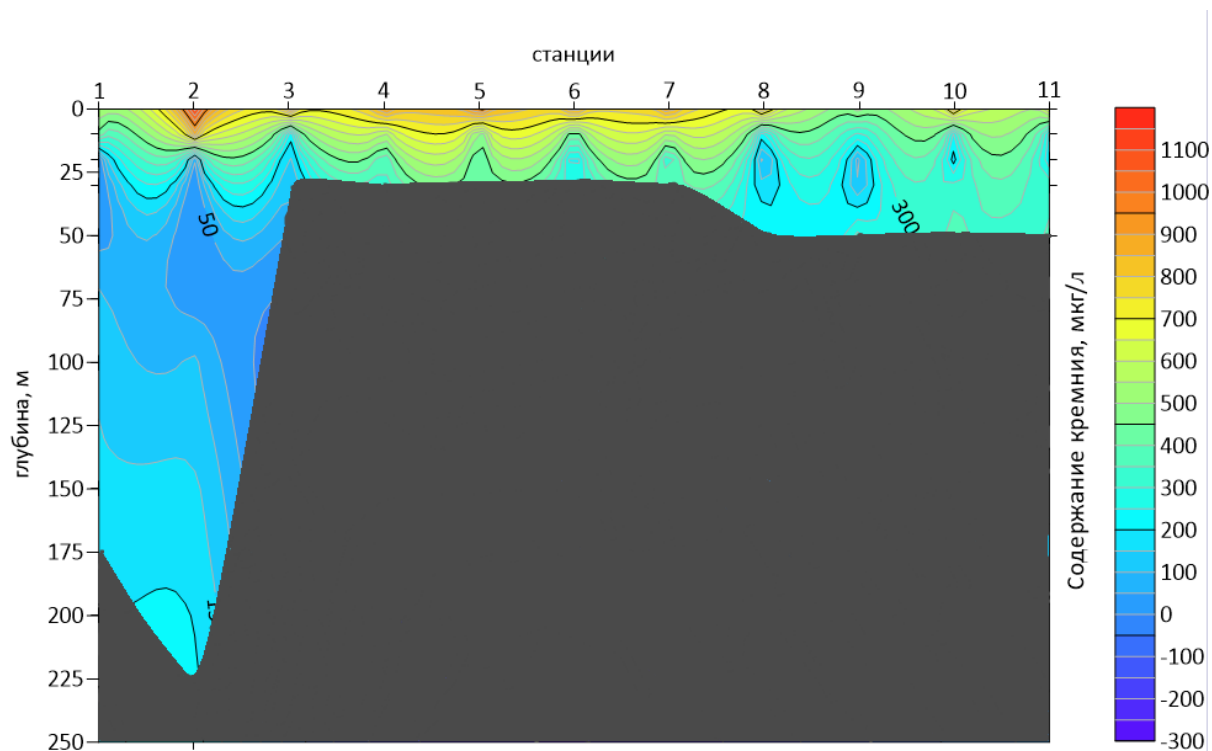


Рис. 3.24. Изменение концентрации силикатов с глубиной в Карском море
(2 разрез)

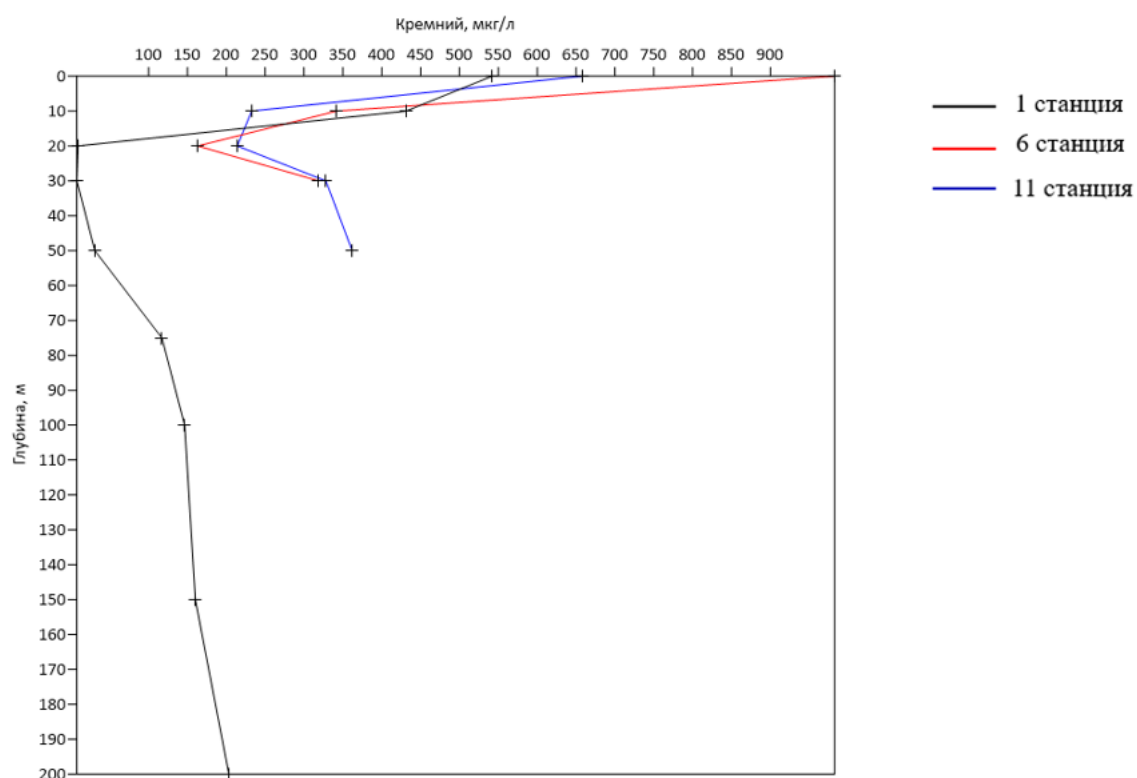


Рис. 3.25. Изменение концентрации силикатов с глубиной в Карском море
(2 разрез) на 3 станциях: 1, 6 и 11

Также концентрация силикатов в воде позволяет судить о происхождении микропластика, либо он принесён с атлантическими водами, либо с речными водами.

По выше проведённому анализу, можно сделать вывод о том, что в Баренцевом море будет преобладать пластик атлантического происхождения, так как разрез лежит в зоне атлантической водной массы, которая приносит свои воды с Атлантического океана, где самое большое скопление мусора. А в Карском из-за большого расхода рек: Енисея и Оби (речной водной массы) - речного.

Также можно отметить, что атлантические воды практически не попадают в Карское море, и соответственно, основным источником загрязнения считаются речные воды.

Также для наглядности приведен вертикальный профиль содержания кремния на 3 разрезе (рис. 3.26 - 3.27), где видно, что содержания силикатов ниже 50 мкг/л на всем разрезе. А значит и влияние речных вод отсутствует.

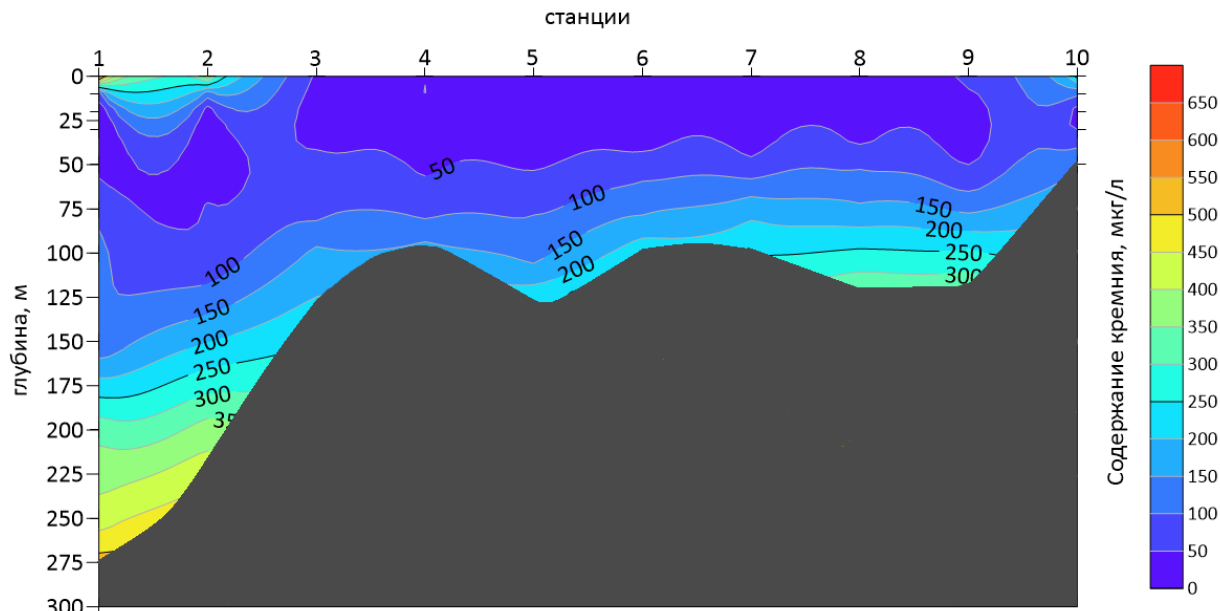


Рис. 3.26. Изменение концентрации силикатов с глубиной в Карском море
(3 разрез)

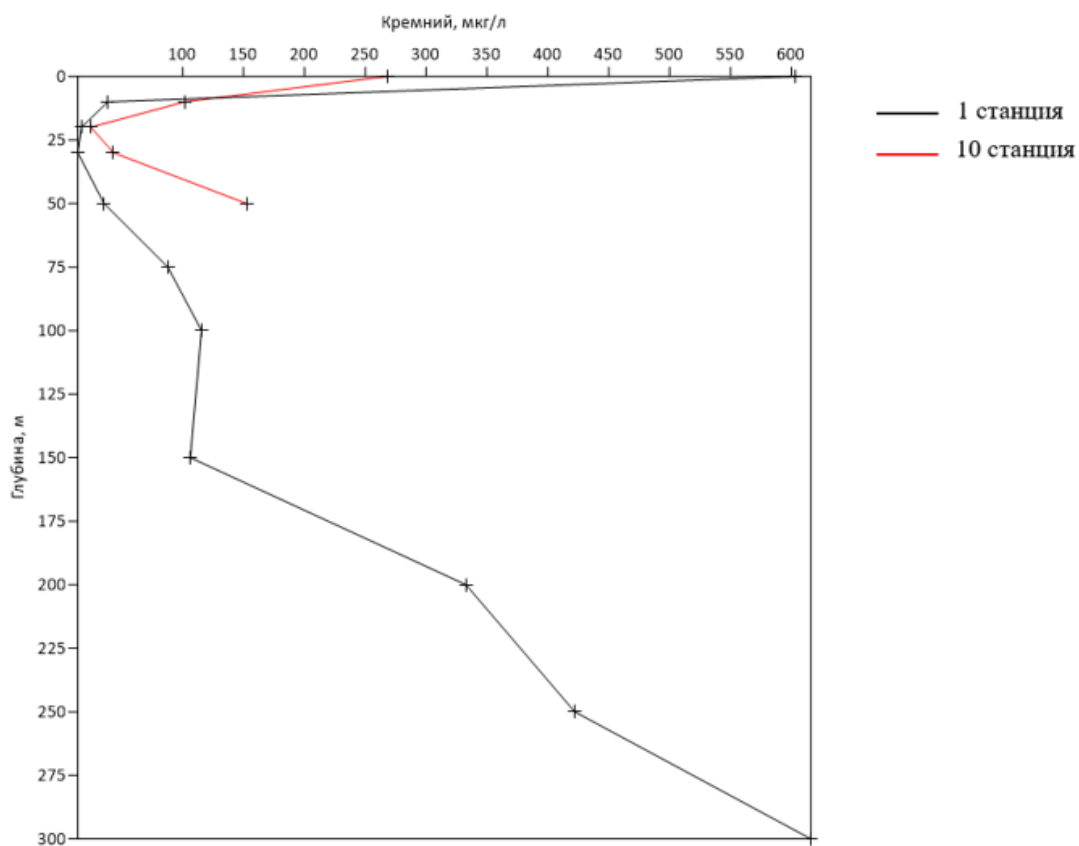


Рис.3.27. Изменение концентрации силикатов с глубиной в Карском море (3 разрез) на 2 станциях: 1 и 10

3.3. Анализ распределения микропластика в морях Западной Арктики.

Проведём сравнения данных экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 и проведенных исследований того же года [5] по станциям в Баренцевом и Карском морях.

1 разрез - 1 станция.

Содержание: 4.2 шт./м³.

Состав: полипропилен (PP) – 14%, пигмент – 86%. (рис. 3.28)

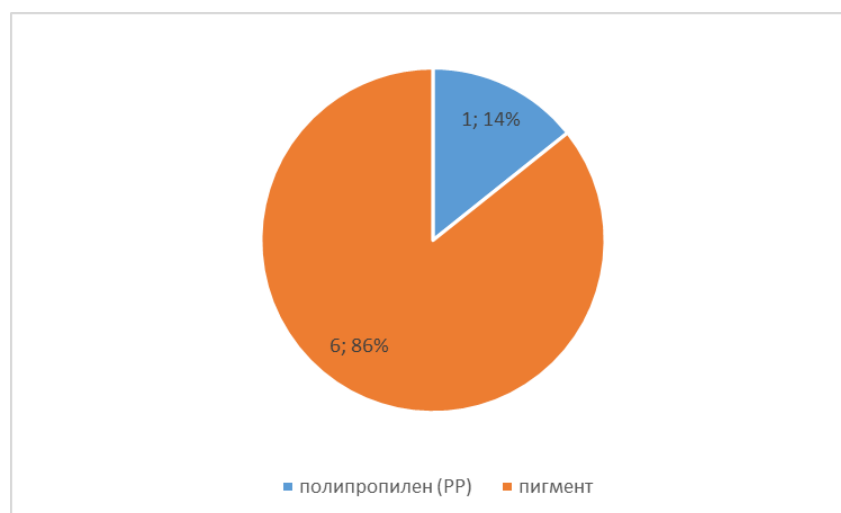


Рис.3.28. Химический состав найденных синтетических микрочастиц в Карском море (К-1, 1 станция)

1 разрез - 9 станция.

Содержание: 1 шт./м³:

Состав: полиэтилентерефталат (ПЭТ, PET) – 100%. (рис. 3.29)

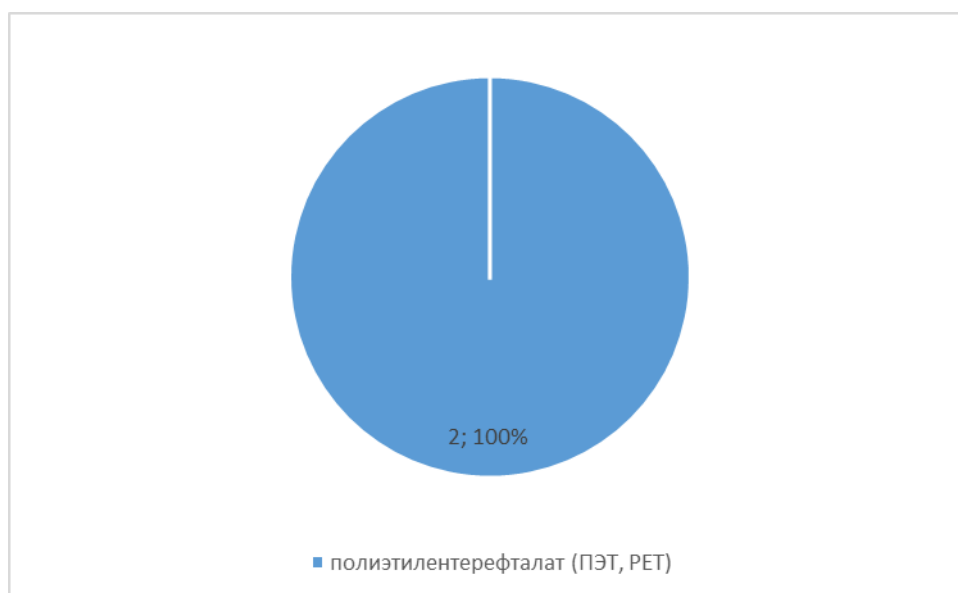


Рис.3.29. Химический состав найденных синтетических микрочастиц в Карском море (К-1, 9 станция)

2 разрез - 5 станция.

Содержание: 3.8 шт./м³.

Состав: полилактид (PLA) – 50 %, полиэтилентерефталат (ПЭТ, PET) – 50%.
(рис. 3.30.)

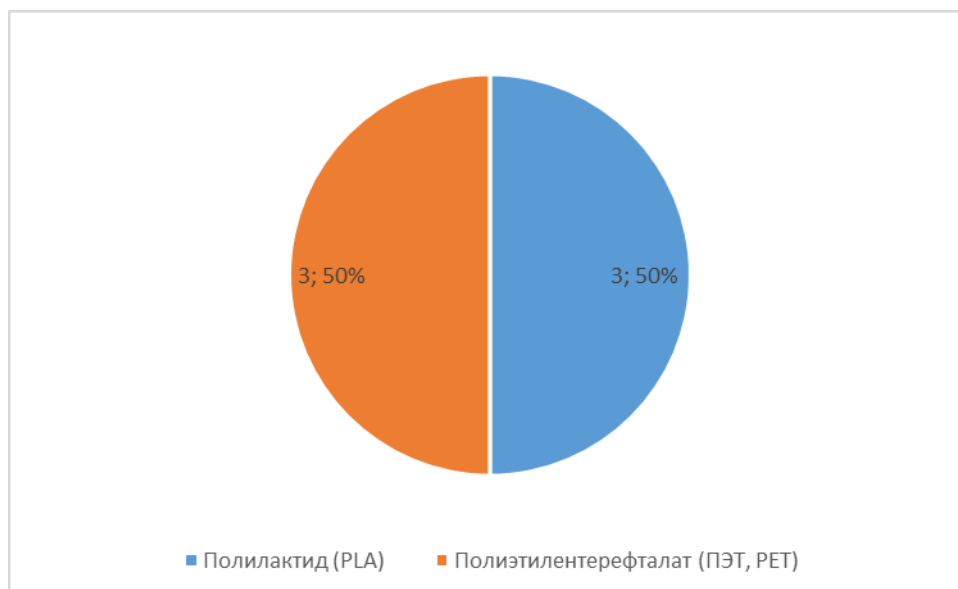


Рис.3.30. Химический состав найденных синтетических микрочастиц в Карском море (К-2, 5 станция)

2 разрез - 8 станция.

Содержание: 4.1 шт./м³.

Состав: полилактид (PLA) – 54%, пигмент – 46 %. (рис. 3.31)

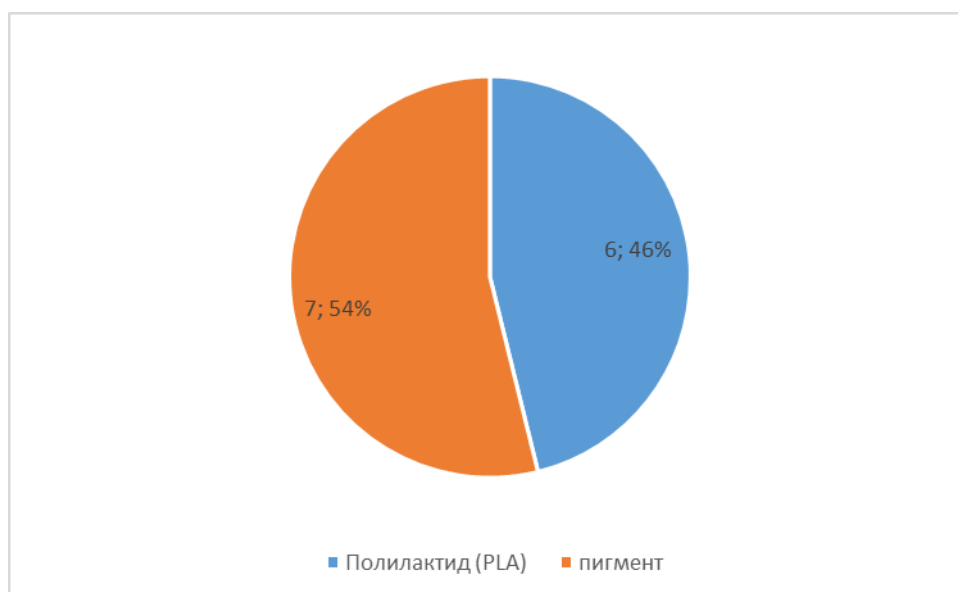


Рис.3.31. Химический состав найденных синтетических микрочастиц в Карском море (К-2, 8 станция)

3 разрез - 1 станция

Содержание: 1.0 шт./м³.

Состав: полиэтилен (PE) – 100%. (рис.3.32)

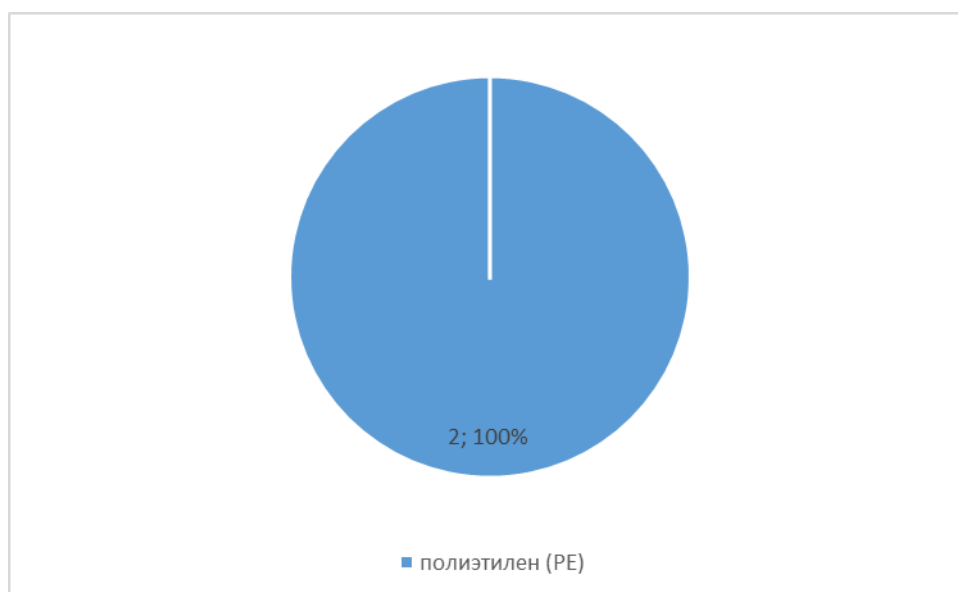


Рис.3.32. Химический состав найденных синтетических микрочастиц в Карском море (К-3, 1 станция)

Баренцево море:

1 станция. Содержание: 28 шт./м³

Состав: полиэтилен (PE) – 4%, полиэтилентерефталата (ПЭТ, PET) – 79%, пигмент – 17%. (рис. 3.33)

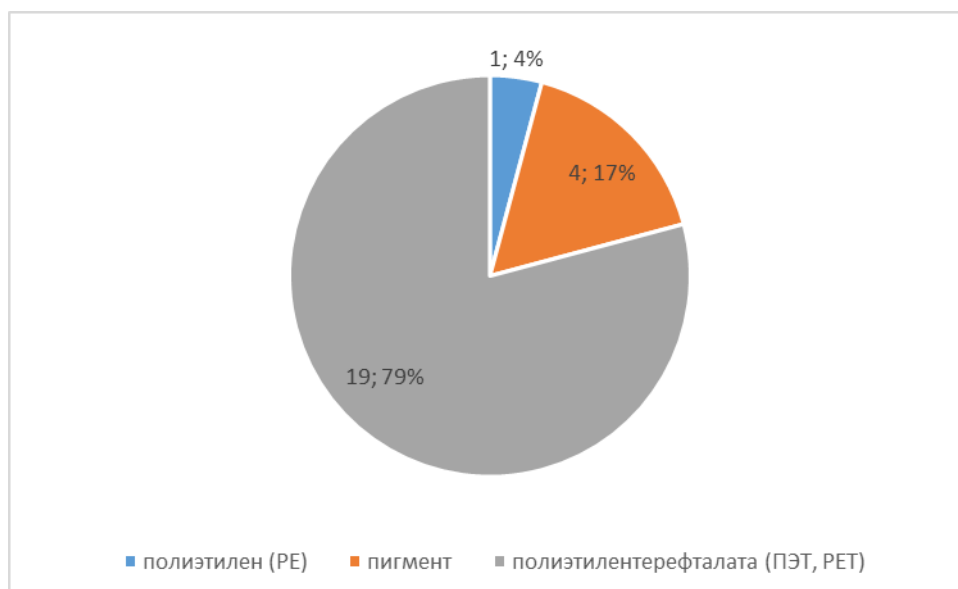


Рис.3.33. Химический состав найденных синтетических микрочастиц в Баренцевом море (1 станция)

18 станция. Содержание: 2.0 шт./м³

Состав: пигмент -100%. (рис. 3.34)

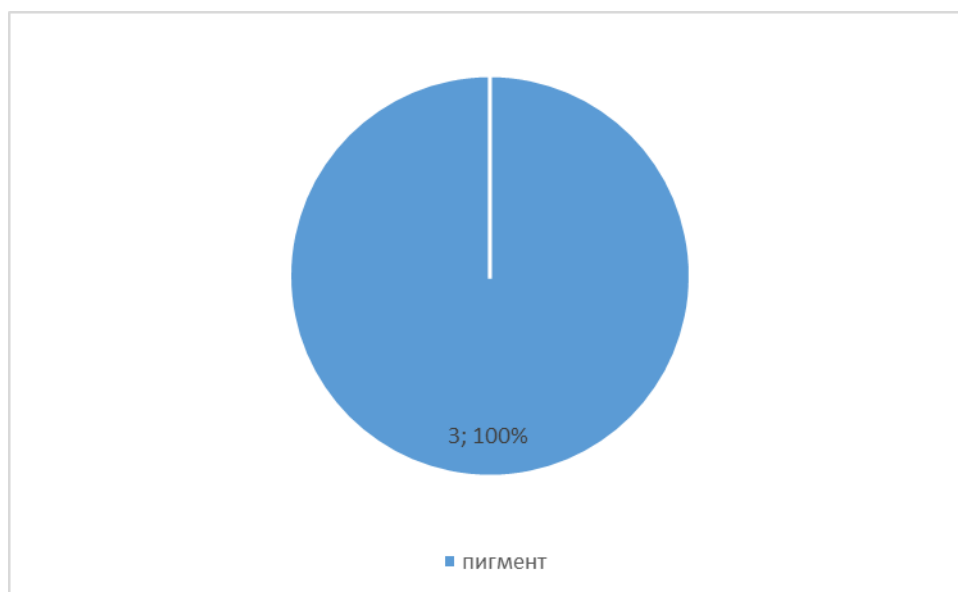


Рис.3.34. Химический состав найденных синтетических микрочастиц в Баренцевом море (18 станция)

Из диаграмм видно, пигмент встречается практически на всех станциях за исключением, К-1-9, К-2-5 и К-3-1.

РР (полипропилен) встречается только на одной станции К-1-1.

ПЭТ (полиэтилентерефталат) – К-1-9, К-2-5, К-3-1 и Б-1.

РЕ – Б-1, К-3-1.

PLA (полилактид) – только на 2 разрезе.

Пигмент не встречается в речном в плюме и линзе Карского моря. Однако он наблюдался на 2 разрезе 8 станции, однако она расположена на границе с полярной водной массой.

Основное скопление пигмента расположено в прибрежной водной массе Баренцево моря, и в Карском море (3 разрез), где присутствуют баренцевоморские прибрежные воды. И также в баренцевоморских водах (разрез 1 Карского моря, 1 станция) на севере архипелага Новая Земля. Как раз только на этой станции обнаружен полипропилен (РР).

Видно, что полиэтилентереффт (ПЭТ) также встречается в речных водах Карского моря (и в плюме и в линзе). Также для плюма характерен полилактид (PLA).

В прибрежной водной массе Баренцево моря и баренцевоморских прибрежных водах Карского моря также встречается полиэтилентерефталат (ПЭТ), где воды также менее солёные. Для этой массы также характерен полиэтилен (PE).

В прибрежной зоне Баренцева и Карского морей различие микропластика мало. Такое же состояние и в речных водах (линзе) Карского моря. Разнообразие микропластика увеличивается к западу Баренцева моря, где атлантические воды, Также большое многообразие микропластика замечено в плюме Карского моря и в баренцеворских водах на севере архипелага Новая Земля.

Самое большое количества микропластика отмечено в Баренцевом море, на западе разреза (1 станция), где господствуют атлантические воды. Содержание микропластика на севере архипелага (1 разрез 1 станция) и в плюме (2 разрез 5 станция и 8 станция), больше чем в линзе (1 разрез 9 станция) и в прибрежной зоне (разрез Баренцева моря 18 станция и разрез 3 станция 1).

Согласно результатам полученных в [5], состав микропластика речных и атлантических вод:

Речной сток – плюм: 43% Акрил, и 57% полиэстр.

Речной сток - линза: 5% PE, 7% PP, 5% PS (полистирен), 5% PA (полиамид), 28% акрил, 7% другие, 40% полиэстр и PTFE – 3%.

Атлантические воды: 12% PE, 4% PP, 4% PS, 4% PA, 12% акрил, 8% другие, 8% PUR (полиуретан), 8% PVC, 33% полиэстр и PTFE – 4%.

Видно, что речные воды (плюм) имеют менее разнообразный состав микропластика, в сравнении с атлантическими водами и линзой речных вод Карского моря.

Таким образом, сравнивая результатов полученных в экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 с результатами представленными в работе [5], получили противоречивые результаты.

В экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 самое большое разнообразие микропластика встречается в Атлантических водах, самое маленькое во внешнем плюме Карского моря. Во всех остальных примерно их поровну.

В результатах представленных в [5] видно, что речные воды (внутренний плюм) имеют менее разнообразный состав микропластика, в сравнении с атлантическими водами и линзой речных вод Карского моря.

Однако следует иметь ввиду, что количество проб в экспедиции ТРАНАКРКТИКА-2019 было значительно меньше, чем в результатах представленной работы [5].

Заключение

Был проведен анализ водных масс в период проведения экспедиций в августе-сентябре 2019. Было выделено по температуре и солёности в исследуемом районе Баренцева моря две водные массы: атлантическая и прибрежная; в Карском море: 3 водных массы: баренцевоморская ВМ, речной сток и полярная ВМ. Все выделенные массы соответствуют в среднем картине распределения водных масс на акватории морей.

Также был выполнен анализ загрязнения вод. Было отмечено, что различие микропластика мало в прибрежной зоне Баренцева и Карского морей, а также в речных водах (линзе) Карского моря. Большое разнообразие микропластика отмечено в западной части Баренцева моря исследуемого разреза, где отмечается влияние атлантических вод. Также многообразие микропластика в баренцевоморских водах на севере архипелага Новая Земля и во внутреннем плюме Карского моря. Таким образом, сравнивая результатов полученных в экспедиции ТРАНСАРКТИКА-2019 с результатами представленными в работе [5], получили противоречивые результаты. Где в результатах [5] видно, что внутренний плюм имеет менее разнообразный состав микропластика, в сравнении с атлантическими водами и линзой речных вод Карского моря.

Литература

1. Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г. и др. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / ПИНРО — Мурманск, 2016;
2. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М., Изд-во МГУ, 1982 г. С ил., 192 с.
3. Микропластиковое загрязнение морской среды Баренцева и Карского морей в 2019 г./А. А. Ершова, Т. Р. Ерёмина, И. Н. Макеева, Д. В. Панькин, Ю. А. Татаренко, А. В. Березина, А. С. Кузьмина
4. Пластиковое загрязнение Мирового океана, 2022/ А.А. Ершова, Т.Р. Ерёмина
5. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00091-0>
6. <https://education.nationalgeographic.org/resource/microplastics/>
7. <https://naked-science.ru/article/sci/akkumulyatsii-morskogo-musora-na-novoj-zemle>
8. Ершова А. А., Татаренко Ю. А. Пробоотборник для определения содержания микропластика в морской воде (HydroPuMP). Патент на полезную модель 206110 U1, 24.08.2021. Заявка № 2020144043 от 28.12.2020.
9. Система Баренцева моря / под ред. академика А. П. Лисицына. – М.: ГЕОС, 2021. 672 с.
10. <http://esimo.oceanography.ru> (<https://clck.ru/34g8L6>)
11. Речные плюмы/А.А. Осадчиев. – М.: Научный мир, 2021 – 288с.
12. <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=63>
13. Siberian river run-off in the Kara Sea: Characterisation, quantification, variability, and environmental significance/ September 16, 2003/ R. Stein, K. Fahl, D.K. Fütterer, E.M. Galimov, O.V. Stepanets