

На правах рукописи



Полухин Александр Анатольевич

**ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД КАРСКОГО МОРЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ
КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СТОКА**

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор географических наук **Маккавеев Петр Николаевич**

Официальные оппоненты:

Коновалов Сергей Карпович, доктор географических наук, член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Морского гидрофизического института Российской академии наук, г. Севастополь

Ефимова Людмила Евгеньевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник кафедры гидрологии суши Географического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова»

Защита состоится « 19 » мая 2017 года в 12 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 002.239.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/disser/> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «28 » марта 2017 года.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

Кандидат физико-математических наук  Гинзбург Анна Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Карское море – шельфовое окраинное море (более 50% площади моря имеет глубину от 50 до 100 м). Уникальность его состоит в том, что оно принимает в себя огромный объем пресных вод. В море поступает более половины речного стока всех морей Сибирской Арктики или более трети всего речного стока в Арктику. Количество рек, впадающих в море, велико, но основная составляющая пресноводного баланса поступает из двух крупнейших рек России – Оби и Енисея. Кроме мощного материкового стока, в пресноводный баланс моря свой вклад вносят атмосферные осадки и воды, образующиеся при таянии льда, в том числе выносимого реками. Локальный вклад вносят пресноводный сток с островов, деградация покровных ледников и мерзлотных пород. Оценка воздействия различных источников пресных вод на поверхностный слой моря и анализ факторов, способствующих распространению материкового стока, позволяют уточнить представление о механизме формирования поверхностного опресненного слоя Карского моря.

Рассматривая только распределение солености вод в поверхностном опресненном слое, сложно выделить речную составляющую пресноводного баланса Карского моря, отделив ее от талых и атмосферных вод. Достоверно идентифицировать речные воды можно, привлекая гидрохимические показатели. Это связано с различным соотношением главных ионов в речных и морских водах. При смешении вод в поверхностном опресненном слое изменяется относительное содержание главных ионов (доля ионов в общей минерализации). Считается, что надежным индикатором присутствия речных вод служит отношение Alk/S (или УЩ – удельная щелочность). УЩ менее 0.07 характеризует чисто морскую воду, а более высокая величина УЩ свидетельствует о присутствии в том или ином количестве вод материкового стока [Смирнов, 1955] или талых вод. Для установления генезиса вод используется и изотопный состав воды [Bauch et al., 1995; Bauch et al., 2005; Дубинина и др., 2015], однако существующих данных недостаточно по

сравнению с имеющимся массивом данных, накопленным по результатам традиционных гидрохимических определений.

Цель работы: исследовать вклад материкового стока (главным образом, вод Обской губы и Енисея), а также талых вод в формирование поверхностного опресненного слоя Карского моря.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- Оценка объема пресных вод, ежегодно поступающих в поверхностный (0-20 м) слой моря;
- Определение гидрохимических характеристик (содержание кремния, общего углерода, общей щелочности) основных составляющих пресноводного баланса моря;
- Расчет относительного вклада основных источников пресной воды в формирование поверхностного слоя Карского моря;
- Анализ влияния гидрометеорологических условий на распространение пресной воды из основных источников;
- Исследование влияния локальных источников пресных вод на гидрохимическую структуру прибрежной акватории Новой Земли.

Научная новизна исследования. Впервые проведена оценка вклада речных и талых вод в формирование поверхностного слоя Карского моря с применением модифицированного метода расчета, основанного на уравнении смешения нескольких типов вод. Отличительной особенностью расчета является применение гидрохимических характеристик смещающихся вод вместо широко распространенного метода с использованием гидрологических параметров (температуры и солености).

Впервые проведена оценка доли талых вод в поверхностном опресненном слое, хотя ранее неоднократно отмечалось, что в процессе формирования поверхностного слоя они играют значительную роль.

Также в работе отражены уникальные результаты исследований малых водотоков Новой Земли и показано их воздействие на гидрохимическую структуру прибрежной акватории.

Защищаемые положения:

1. Установлено, что количество пресной воды, необходимой для формирования профиля солености в верхнем 20-метровом опресненном слое, связано с соленостью на поверхности определенной функциональной зависимостью.
2. Получено, что около 50% поверхностных вод Карского моря в летне-осенний сезон (август-сентябрь) составляют воды из Обской губы и Енисея, а также талые воды. Из этого количества порядка 25% занимают обские воды, енисейским принадлежит 10%, на долю талых вод приходится 15%.
3. На основании анализа гидрометеорологических данных и расчета вклада основных источников в формирование поверхностного опресненного слоя выявлено, что в силу сезонной особенности гидрологического режима Оби и Енисея в августе-сентябре отмечается преобладание обских вод над енисейскими.
4. Показано, что сток талых вод с восточного побережья Новой Земли обогащен биогенными элементами (минеральный азот, фосфор и кремний). Влияние пресных вод на изменение гидрохимической структуры поверхностного слоя прослеживается на расстоянии 10–40 км от источника.

Достоверность полученных результатов обеспечена современными методиками определения гидрохимических параметров и элементов карбонатной системы в морской воде, используемыми в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН). Приборная база Лаборатории биогидрохимии ИО РАН соответствует современному уровню и позволяет проводить высокоточные определения основных гидрохимических элементов.

Научное и практическое значение исследования. Изучение распространения материкового стока и оценка влияния различных источников пресных вод позволяют уточнить механизм формирования поверхностного опресненного слоя Карского моря. Это имеет не только научное, но и практическое значение. В условиях возрастания антропогенной нагрузки на акваторию моря, ввиду нахождения здесь больших объемов углеводородного

сырья [Грамберг и Супруненко, 2000], и на бассейны водосборов рек, впадающих в него, необходимо не только исследовать пути переноса материкового стока как основного механизма транспортировки питательных и загрязняющих веществ, но и определять генезис пресных вод из различных источников. Это позволит выявлять места наиболее вероятного накопления загрязняющих веществ.

Расчет вклада различных источников в формирование поверхностного слоя Карского моря позволил уточнить представление о том, как по акватории моря распределяются воды самых крупных рек Сибири – Оби и Енисея. Выявленный объем пресных вод, поступающих в море в процессе таяния льдов (морских, речных, материковых), может использоваться для анализа межгодовой изменчивости характеристик ледового покрова в Карском море, а также в других арктических морях.

Полученная в работе оценка вклада водотоков Новой Земли в баланс биогенных элементов прибрежных акваторий может инициировать новые исследования роли водотоков многочисленных арктических островов в формировании биопродуктивности вод Северного Ледовитого океана.

Личный вклад автора:

- 1) Участие в экспедициях ИО РАН в Карское море в 2011, 2013, 2014 гг., в ходе которых были получены данные, использованные в работе;
- 2) Отбор проб и лабораторный анализ биогенных элементов, pH, общей щелочности, растворенного кислорода в указанных экспедициях;
- 3) Камеральная обработка и анализ полученных в экспедициях данных и архивных материалов по экспедициям в Карское море;
- 4) Постановка лабораторных экспериментов по выщелачиванию минеральных форм биогенных элементов и неорганического углерода из образцов пород, слагающих берега заливов Новой Земли;
- 5) Подготовка полученных результатов к публикации, а также представление их на российских и международных конференциях.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены и

обсуждались на Ученом совете Физического направления ИО РАН (2015 г.), а также российских (Школа по морской геологии 2013 г., Москва; Экосистема Карского моря 2015 г., Москва) и международных (EGU General Assembly в 2012, 2013, 2015 и 2016 гг. в Вене, Австрия; рабочая встреча по проекту GEOTRACES в Москве в 2012 г.; AOGS General Assembly 2012 в Сингапуре; Arctic Ocean Acidification 2013 в Бергене, Норвегия; Ocean Sciences Meeting 2014 в Гонолулу, США; 26 IUGG General Assembly 2015 в Праге, Чешская Республика) конференциях.

Публикации соискателя по теме диссертации. Материалы диссертации полностью изложены в работах, опубликованных соискателем. По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научных изданиях из списка, рекомендованного ВАК [1-7], одна статья в международном рецензируемом издании из списка, рекомендованного ВАК [8], 8 статей и тезисов в сборниках докладов российских и международных научных конференций [9-16].

Благодарности. Автор выражает признательность своему научному руководителю д.г.н. П.Н. Маккавееву. Автор благодарит д.б.н., члена-корр. РАН М.В. Флинта за возможность участия в экспедициях ИО РАН в Карское море, к.ф.-м.н. С.А. Щуку за предоставление основополагающих данных по температуре и солености вод Карского моря, к.г.н. А.И. Шикломанова за предоставление ценных данных по стоку рек, к.ф.-м.н. А.А. Осадчева и А.А. Недоспасова за помощь в получении данных реанализа, к.ф.-м.н. П.А. Стунжаса за ценные комментарии и интерес к работе, Lars-Otto Reirsен (AMAP, Норвегия) за поддержку участия в международных конференциях, к.г.-м.н. Н.А. Шульгу, к.т.н. Г.В. Айзеля за ценные комментарии при подготовке работы. Автор также благодарит соавторов публикаций за плодотворное сотрудничество и всех, с кем посчастливилось работать в экспедициях в Карское море. Особая благодарность выражается семье и друзьям за терпение и поддержку при подготовке автором диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав,

заключения, списка использованных источников, приложения. Объем работы составляет 149 страниц. Текст диссертации содержит 63 рисунка и 13 таблиц. Библиографический список включает в себя 113 наименований, в том числе 24 на иностранных языках. В приложении содержится 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении представлены обоснование актуальности темы, состояние изученности проблемы, основная цель исследования, поставленные задачи, научная новизна, основные защищаемые положения, достоверность полученных результатов, практическая значимость, личный вклад автора, апробация результатов исследования и список опубликованных диссертантом работ.

В Главе 1 представлены общие географические сведения об акватории Карского моря (раздел 1.1), история исследования региона (раздел 1.2), основные океанографические характеристики вод Карского моря (раздел 1.3).

В Главе 2 приведены методы определения гидрохимических параметров, используемых в работе (раздел 2.1).

Обзор данных приведен в разделе 2.2. Из всех имеющихся источников отбирались станции, на которых проводились гидрохимические определения. Далее данные проходили экспертную проверку и, если возникали сомнения в их качестве (плохой уровень аналитики, систематические или случайные ошибки, ошибки при перенесении данных), данные отбрасывались. Проверка массивов фактических данных проходила в несколько стадий, на первой – машинной стадии – отбраковывались грубые ошибки. На второй – ручной – сомнительные данные проверялись по соотношению с другими гидрохимическими и гидрологическими параметрами по методике, разработанной в ЛБ ИО РАН [Гусарова и др., 2000].

В основу работы положены материалы 5-ти рейсов ИО РАН в Карское море (1993, 2007, 2011, 2013, 2014 годов) (рис. 1).

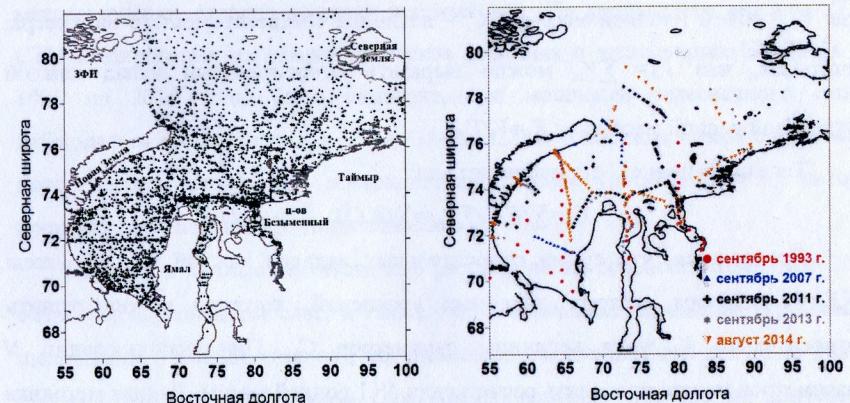


Рисунок 1. Схема расположения станций по архивным (слева) и экспедиционным (справа) данным Лаборатории биогидрохимии ИО РАН

Кроме того, в работе использованы материалы World Ocean Database [Boyer et al., 2013] и база гидрохимических данных по акватории Карского моря, собранная сотрудниками Лаборатории биогидрохимии.

При описании распространения речного стока использованы данные Росгидромета по расходу воды на гидрологических постах в Салехарде (р. Обь) и Игарке (р. Енисей). Для получения материалов по динамическому воздействию ветра на поверхностный слой моря использованы данные реанализа NCEP/NCAR. В работе использованы обзорные ледовые карты Северного Ледовитого океана Центра ледовой и гидрометеорологической информации ААНИИ для определения времени начала ледостава, возраста и толщины льда на разных его участках, а также сплошности льда в период таяния.

В разделе 2.3 описан примененный в работе подход, разработанный в Лаборатории биогидрохимии ИО РАН [Власова и др., 2005]. Он основан на предположении, что при смешении вод величина консервативного (или квазиконсервативного) параметра C_0 может быть описана следующим уравнением:

$$C_0 V_0 = C_1 V_1 + C_2 V_2 + C_3 V_3 + \dots \dots , \quad (1)$$

где V_i – объем i -водной массы, а C_i – величина соответствующего параметра; учитывая, что $V_0 = \sum V_i$, можно выразить относительный вклад каждой отдельной водной массы как $K_i = V_i/V_0$.

Тогда уравнение (1) приобретает вид:

$$C_0 = \sum(C_i V_i / \sum V_i) = \sum(K_i C_i). \quad (2)$$

Предполагая, что сумма относительных вкладов каждой водной массы $\sum K_i = 1$, получим систему линейных уравнений, которую можно решить относительно K_i , зная величины параметров C_i . При использовании N параметров можно проводить расчеты для $N+1$ водной массы. Данная методика подробно описана в работах [Власова и др., 2005; Anderson et al., 2004].

При подготовке данной работы метод усовершенствован автором. По фактическим данным о распределении солености рассчитывалась доля пресных вод, которая необходима для формирования профиля поверхностного опресненного слоя. По уравнению смешения и гидрохимическим характеристикам вод открытой части моря рассчитывались содержания общего неорганического углерода, растворенного кремния, минерализации и общей щелочности для «гипотетической» пресной воды, необходимой для формирования поверхностного слоя. В итоге, для данной «гипотетической» воды рассчитывались доли вод Оби, Енисея и талых вод. Этот метод успешно работает при существенном разнообразии состава источников вод.

Основная сложность данного подхода состоит в выборе значений гидрохимических параметров для различных источников (C_i). В тех случаях, когда эти значения нельзя было получить из прямых определений, применялся регрессионный анализ или использовались средние многолетние значения.

В Главе 3 рассмотрены типы вод, вносящие основной вклад в формирование поверхностного слоя Карского моря, и приведены их характеристики. К ним относятся *морские, обские, енисейские и талые воды*. В разделе 3.1 приведены общие сведения о влиянии пресноводного стока на формирование поверхностной структуры вод Карского моря, рассмотрены

методы оценки степени влияния пресных вод. По результатам анализа 271 СТД-зондирования на океанологических станциях в экспедициях ИО РАН с 1993 по 2014 годы было выявлено, что мощность опресненного слоя наблюдалась в диапазоне от 3–5 м до 15–20 м. Таким образом, говоря о влиянии материкового стока на поверхностный слой Карского моря, автор подразумевает верхний 20-метровый слой.

Используя данные вертикального распределения солености в верхнем 20-метровом опресненном слое, а также гидрохимические параметры (кремний, щелочность и общий углерод), по уравнению смешения была получена доля пресных вод в поверхностном слое. Далее, соотнеся полученные значения долей пресной воды в поверхностном опресненном слое с соленостью на поверхности, автор получил результат, который можно выразить следующим соотношением:

$$D_w = 0.99 * \exp(-0.08 * S) - 0.001 * S,$$

где D_w – доля пресных вод, S – соленость на поверхности. Данное уравнение регрессии выбрано с учетом того, что коэффициент корреляции для этого распределения наивысший (0.91). Полученная зависимость может применяться для оперативного расчета запаса пресных вод в поверхностном опресненном слое Карского моря.

Раздел 3.2 содержит сведения о типах морских вод, находящихся в акватории Карского моря. Раздел 3.3 представляет собой описание характеристик талых вод в поверхностном опресненном слое моря, а также описывает характер влияния талых вод на поверхностный слой. Воды, образующиеся при таянии морского и речного льда, занимают важное место в формировании поверхностного слоя Карского моря, а также влияют на химический состав и свойства поверхностной водной массы, образующейся в результате воздействия разных гидрометеорологических условий (действие ветра, изменчивость температуры воздуха и солнечной радиации) [Пивоваров,

2000]. Известно, что речной лед по своим химическим свойствам сильно отличается ото льда, сформировавшегося в открытом море.

Сведения о географических особенностях, изученности и режиме вод акватории Обской губы даны в разделе 3.4. Исследование особенностей акватории Обской губы ведется с 20-х годов прошлого века [Пивоваров, 2000]. На основании архивных данных выявлено, что pH вод Обской губы имеет небольшую многолетнюю изменчивость (в пределах 0.1–0.2 ед. шкалы NBS). В северной части Обской губы общая щелочность является практически постоянной (0.65–0.7 мг-экв/л). Архивные данные (1921–2010 гг.) показывают, что при относительно стабильном уровне минерализации температура воды в Обской губе имеет значительную сезонную и межгодовую изменчивость.

Раздел 3.5 посвящен особенностям, изученности и режиму вод акватории Енисейского залива. Воды Енисейского залива отличаются относительной гомогенностью в сравнении с водами Обской губы [Стунжас и Маккавеев, 2014]. По причине особенностей состава пород и почв бассейна водосбора, воды Енисея достаточно сильно отличаются от вод Оби и Обской губы по химическому составу. Содержание гидрокарбонат-иона и среднее содержание растворенного кремния в водах Енисея выше по сравнению с водами Обской губы. Анализ архивных данных показывает, что воды Енисея в среднем на 2°C теплее, чем воды Обской губы. Также на несколько десятых выше и водородный показатель pH.

В Главе 4 представлены результаты расчетов относительного вклада основных источников пресной воды в поверхностный опресненный слой Карского моря, основанные на гидрохимических особенностях вод Обской губы, Енисея, поверхностных вод Северного Ледовитого океана и талых вод. Также рассмотрены случаи различного распределения материального стока по акватории Карского моря в зависимости от гидрологических и метеорологических процессов. В разделе 4.1 описаны типы распространения материального стока по акватории Карского моря и представлена их схема (рис. 2).

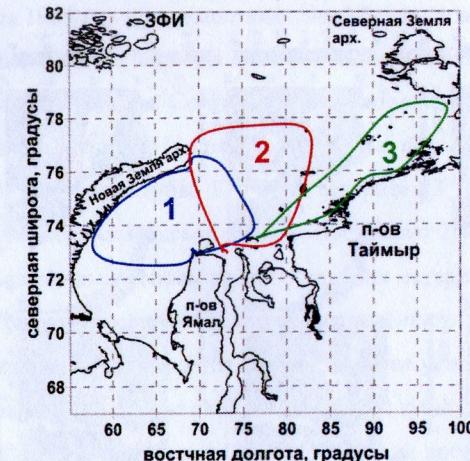


Рисунок 2. Типы распространения речного стока в Карском море: 1 – западный тип (объединен с юго-западным типом), 2 – центральный тип, 3 – восточный тип

Они характеризуются разными гидрометеорологическими условиями и сами могут характеризовать источники пресной воды. Так, для «центрального» типа распространения доля обских вод в поверхностном слое больше, чем для «западного». А енисейских вод в поверхностном слое больше содержится при «западном» типе распространения, чем при «центральном». «Восточный» тип распространения для исследованных лет не проявлялся [Kubryakov *et al.*, 2016].

В разделе 4.2 представлены результаты расчета вклада основных источников пресной воды в формирование поверхностного опресненного слоя Карского моря для августа-сентября (рис. 3).

Кроме того, изложен анализ распространения материального стока по акватории моря, основанный на гидрологических и гидрохимических данных, а также реанализе ветра (данные NCEP/NCAR) и оценке ледового режима (данные ААНИИ).

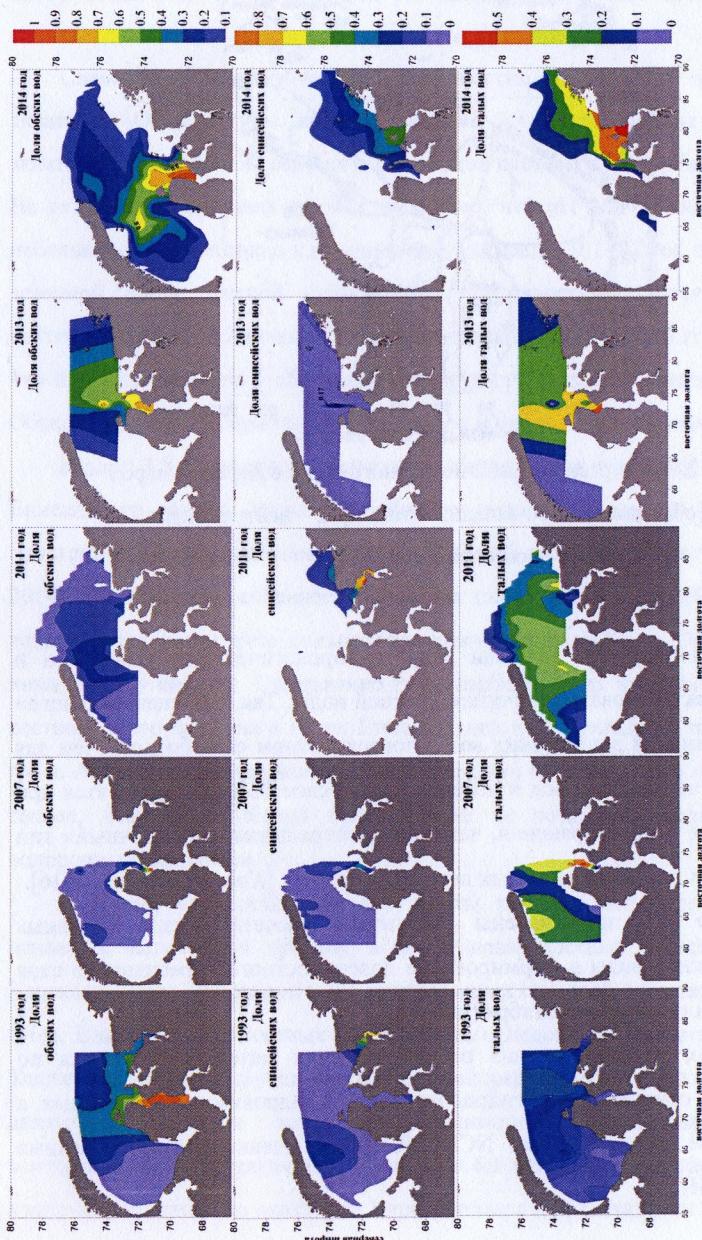


Рисунок 3. Доли вод Обской губы, Енисея и талых вод в поверхностном опресненном слое Карского моря

Для сентября 1993 г. в поверхностном слое вблизи Новой Земли около 1/3 воды принадлежит Енисею, порядка 20% – сток из Обской губы, еще около 10% относятся к талым водам. Соответственно, оставшаяся половина смеси – поверхностная вода Карского моря. В центральной части Карского моря преобладает сток из Обской губы. Его доля севернее 73° с.ш. составляет 30–40%, в то время как доля енисейской воды не превышает 10%. Данная ситуация характеризуется «западным» типом распространения материального стока.

В 2007 г. (сентябрь) воды обского и енисейского происхождения на исследованной акватории выделяются слабо. Севернее устья Обской губы доля обских вод составила 20%. В северной части Обской губы на одной из станций зафиксирована доля енисейских вод (20–30%). Работы восточнее Обской губы не проводились, поэтому не представляется возможным выделение вклада различных вод в этом районе моря. У северо-восточного побережья Новой Земли, как и в 1993 г., отмечается опресненная водами Обской губы и Енисея (10–20%) область. Рассчитанный вклад талых вод в поверхностный слой исследованной акватории весьма высок и составляет 20–30%. Данная ситуация характеризуется «западным» типом распространения материального стока.

Расчеты для 2011 г. (сентябрь) показали, что доля енисейских вод составляла от 100% в центральной части Енисейского залива до 10–20% в северной его части, а также в узкой вдольбереговой зоне к востоку от залива. Такое распределение соответствует атмосферной циркуляции, наблюдавшейся во время исследований. Воды Обской губы составляли от 10% до 20% в центральной части моря. В юго-западной и северо-восточной частях моря также прослеживается влияние обских вод (не превышает 10%). Вклад талых вод составлял от 10% до 20% на всем Обско-Енисейском взморье. Данная ситуация характеризуется «западным» типом распространения материального стока.

В 2013 г. (сентябрь) воды енисейского происхождения в период проведения экспедиционных исследований не выделяются в исследованной акватории моря, воды обского происхождения составляли от 25% до 55%. На южных станциях обского разреза содержание обской воды в поверхностном

слое не достигло 100%, что показывает проникновение морских вод глубоко на юг Обской губы. Вклад талых вод в поверхностный слой в 2013 г. составил 30–35% в центральной части моря, к границам распространения речного стока доля талых вод снизилась до 10%. Столь высокое влияние талых вод на поверхностный опресненный слой вызвано характером ледовой обстановки в конце 2012 – первой половине 2013 гг. вместе с относительно невысоким расходом Енисея. Данная ситуация характеризуется «центральным» типом распространения материкового стока.

По расчетам для 2014 г. (август-сентябрь), доля обской воды в опресненном слое достигала 60%. Также выделяется небольшая опресненная область с долей обских вод до 30% в поверхностном слое к востоку от м. Желания Новой Земли. В центральной части моря вод енисейского происхождения практически не обнаружено. Исключение составили несколько станций в северной части Обской губы, на которых было выявлено более 20% енисейских вод. Енисейские воды в поверхностном слое (10–30%) переместились на восток, к берегу Таймыра. В северной части Енисейского залива доля енисейских вод составила около 50%. Расчеты показывают, что на трех самых южных в Енисейском заливе станциях в поверхностном слое доля талых вод также равна 50%. Полученные результаты расчетов согласуются с данными по ледовому режиму Карского моря в период с октября 2013 г. по июль 2014 г. Также обнаружено небольшое количество талой воды (порядка 10%) поблизости от берега Ямала. Скорее всего, их источник – это остатки льда, скопившегося в Байдарацкой губе: данные ААНИИ показывают наличие льда сплоченностью 1–6 баллов в губе в середине августа. Данная ситуация характеризуется «центральным (веерным)» типом распространения материкового стока.

Изменчивость гидрологического режима вод Оби и Енисея, особенно в период с начала паводка и до октября – основная причина преобладания в поверхностном опресненном слое моря обских вод над енисейскими. Воды Обской губы «накрывают» воду из Енисея, которая, смешиваясь с

поверхностной водой, становится более плотной, и ее свойства в поверхностном слое становятся не столь характерны для поверхностного опресненного слоя.

Доля пресных вод, образующихся при таянии льда, в годовом балансе составляет до 15–30% от всего объема пресных вод, находящихся в поверхностном опресненном слое моря. Такой эффект наблюдается при достаточно позднем освобождении центральной части моря от льда и относительно спокойной метеорологической обстановке над акваторией Карского моря.

Как и следовало ожидать, основным фактором, определяющим характер распространения речных вод, является внутригодовая изменчивость расхода рек, а также воздействие ветра на опресненный поверхностный слой. Стоит отметить, что анализ результатов исследования был бы невозможен без применения в расчетах гидрохимических данных. Также стоит отметить, что характерные для Карского моря типы распространения материкового стока определяют различия вклада вод Обской губы и Енисея.

В заключение стоит сказать, что исследование процессов распространения речных вод по акватории морей в любом районе Мирового океана требует знания не только гидрофизических, гидрологических и метеорологических особенностей акватории, но и химического состава вод морей и рек.

В Главе 5 описывается влияние стока талых вод с Новой Земли на гидрохимическую структуру поверхностного слоя Карского моря. Их влияние не столь велико, но на локальном масштабе может быть определяющим для химического режима вод моря. Небольшие озера, ручьи, водотоки и малые реки Новой Земли в большинстве своем богаты растворенным минеральным фосфором и особенно азотом (концентрации от 1 до 17 μM $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$). В одних водотоках повышенено содержание растворенного кремния, а в других отмечен повышенный показатель pH по сравнению с морскими водами или водами крупных сибирских рек. Данный факт подтверждает ощущимое влияние малых водотоков на гидрохимическую структуру прибрежных вод Новой Земли.

В разделе 5.1 представлены сведения о физико-географических особенностях архипелага и районах крупных заливов Новой Земли. Например, в 2014 г. подробные гидрохимические исследования были проведены в 4-х заливах арх. Новая Земля: Благополучия, Цивольки, Степового и Абросимова. Кроме комплексных океанографических работ, в каждом заливе проводился отбор воды из различных типов водотоков и водоемов по берегам каждого залива.

В разделе 5.2 изложены выявленные особенности гидрохимической структуры вод заливов Новой Земли. Гидрохимическая структура вод заливов Новой Земли во многом схожа со структурой вод Карского моря: наличие пикноклина в теплое время года, подповерхностный максимум кислорода, хорошая аэрированность придонного слоя даже в глубоководной части заливов, увеличение содержания биогенных элементов с глубиной.

Стоит отметить, что ранее гидрохимические исследования в заливах Новой Земли не проводились, поэтому полученные в рейсах ИО РАН данные являются уникальными.

Исследования водотоков и озер по берегам заливов Новой Земли выявили высокие концентрации растворенного кремния, минерального фосфора, общего углерода и особенно минерального азота в их водах. Видимых источников увеличения содержания растворенных форм биогенных элементов (остатков растительности или другого органического вещества) обнаружено не было. Для проверки предположения, что повышенное содержание углерода и биогенных элементов является результатом выщелачивания пород берега, проведены лабораторные эксперименты [Маккавеев и др., 2013].

Для экспериментов взяты собранные в экспедициях образцы анкеритолитового сланца с углистым веществом (черного и бурого цветов), из которых в основном сложены берега заливов. Состав образцов значительно различался. Образцы бурого цвета содержали более 26% CaCO_3 и около 0.5% органического углерода, в черных образцах содержание CaCO_3 составило 0.4%, а органического углерода – более 1%.

Суть эксперимента состоит в том, что образцы породы помещались в емкость с дистиллированной водой с концентрацией супеси 2-3 ПДК (для предотвращения биологической активности). Экспозиция проводилась в течение двух недель. В этой воде измерялись концентрации биогенных элементов, pH, щелочность; полученные значения сравнивались с фоновыми характеристиками. Повторные эксперименты проводились в условиях, приближенных к естественным.

Эксперименты выявили, что после экспозиции образцов в воде в ней увеличивалось содержание азота в общей и неорганической формах, фосфора, кремния. Наблюдался рост pH. Скорость выделения из образцов в воду валового фосфора – от 0.13 до 0.53 mg/m^2 в сутки, кремния – от 0.39 до 1.25 mg/m^2 в сутки, валового азота – от 0.7 до 2.14 mg/m^2 в сутки и общего углерода – от 1.5 до 4.33 mg/m^2 в сутки. Результаты эксперимента подтверждают предположение о том, что повышенное содержание биогенных элементов, а также общего углерода в водах, стекающих с берегов заливов Новой Земли, связано с растворением пород.

В разделе 5.3 показано влияние стока с берегов Новой Земли на поверхность слой прибрежной зоны архипелага. На рисунке 4 приводится пример изменчивости некоторых гидрохимических параметров в поверхностном слое Карского моря при удалении от источника пресного стока.

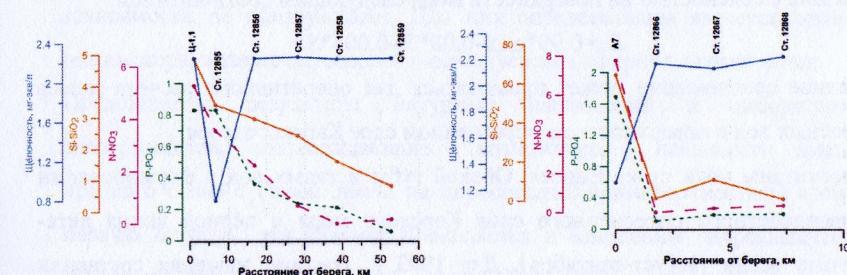


Рисунок 4. Пространственная изменчивость гидрохимических параметров в поверхностном слое на разрезах к зал. Цивольки (слева) и зал. Абросимова Новой Земли (справа) в 2014 г.

Так, для зал. Цивольки этим источником является талая вода из выводного ледника Серп и Молот, а для зал. Абросимова – одноименная река. Анализ данных показывает, что в некоторых случаях влияние пресных вод на изменение гидрохимической структуры поверхностного слоя прослеживается на расстоянии 10–40 км от источника.

Важной особенностью водотоков является высокое содержание в их водах биогенных элементов, зачастую лимитирующих первичное продуцирование в арктических экосистемах.

В **Заключении** представлены выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Систематизированы данные гидрохимических наблюдений, часть которых собрана при участии автора, во многих экспедициях в Карское море. В результате работы определены гидрохимические параметры основных типов вод, участвующих в формировании поверхностного слоя: поверхностные воды открытой части моря, воды Обской губы и Енисея, талые воды морского и речного происхождения.
2. Для оценки поступивших пресных вод в поверхностный слой (0-20 м) моря за исследуемые годы были проведены расчеты с использованием уравнения смешения для нескольких типов вод с различными гидрохимическими характеристиками. Установлено, что доля пресных вод в опресненном слое связана с соленостью на поверхности моря следующим соотношением:

$$D_w = 0.99 \cdot \exp(-0.08 \cdot S) - 0.001 \cdot S.$$

Данное соотношение может применяться для оперативного расчета запаса пресных вод в поверхностном опресненном слое Карского моря.

3. Рассчитаны доли стока Енисея, Обской губы и талых вод в формировании поверхностного опресненного слоя Карского моря в период конца лета–начала осени (август–сентябрь). Для 1993 г. средние значения составили 14.6%, 28.7% и 7% соответственно, для 2007 г. – 9%, 7% и 23% соответственно, для 2011 г. – 8%, 16% и 18% соответственно, для 2013 г. – 1%, 32% и 23.5% соответственно и для 2014 г. – 6%, 24% и 7%

соответственно. Сезонность гидрологического режима Оби и Енисея, особенно в период с начала паводка и до конца летнего сезона – основная причина преобладания в поверхностном опресненном слое моря обских вод над енисейскими. Доля пресных вод, образующихся при таянии льда, в годовом балансе составляет 10–30% от всего объема пресных вод, находящихся в поверхностном опресненном слое моря. Такой эффект наблюдается при достаточно позднем освобождении центральной части акватории от льда и относительно спокойной метеорологической обстановке над акваторией Карского моря. Стоит отметить, что важность воздействия талых вод на поверхностный опресненный слой неоднократно обсуждалась в работах по Карскому морю, но их вклад в его формирование оценен впервые.

4. Важным фактором, характеризующим вклад основных источников пресных вод в поверхностном опресненном слое, оказывается тип распространения материкового стока по акватории моря. Так, при «западном» типе доля енисейских вод выше, чем при «центральном». В свою очередь, доля вод из Обской губы выше при «центральном» типе, чем при «западном». В целом для обоих указанных типов распространения стока доля обских вод превалирует над енисейскими в августе–сентябре. «Восточный» тип распространения в имеющиеся периоды исследований не наблюдался. Доля талых вод в поверхностном слое от типа распространения прямой зависимости не обнаруживает. Для них определяющим является ледовый режим моря, а также метеорологические условия в период таяния льдов.
5. Представлены результаты натурных наблюдений и лабораторных экспериментов, подтверждающие возможность локального влияния пресного стока с Новой Земли на опресненный приповерхностный слой. В первую очередь, это влияние проявляется в изменении гидрохимической структуры вод заливов Новой Земли. При отсутствии прямого влияния материкового стока из Обской губы и Енисея (то есть при «центральном» и «восточном» типе распространения) воздействие водотоков Новой Земли

может быть определяющим для всей прибрежной акватории. Наличие мощных источников биогенных элементов способно влиять на локальные экосистемы заливов, являющихся полузамкнутыми водными объектами.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Артамонова К.В. Особенности гидрохимического режима Обской губы в период открытой воды / К.В. Артамонова, С.А. Лапин, О.Н. Лукьянова, П.Н. Маккавеев, А.А. Полухин // Океанология. – 2013. – Т. 53. – № 3. С. – 357–366.
2. Маккавеев П.Н. Поверхностный сток биогенных элементов с берега залива Благополучия (арх. Новая земля) / П.Н. Маккавеев, А.А. Полухин, П.В. Хлебопашев // Океанология. – 2013. – Т. 53. – № 5. – С. 610–617.
3. Маккавеев П.Н. Гидрохимическая характеристика вод западной части Карского моря (по материалам 59-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш») / П.Н. Маккавеев, З.Г. Мельникова, А.А. Полухин, С.В. Степанова, П.В. Хлебопашев, А.Л. Чульцова // Океанология. – 2015. – Т. 55. – № 4. – С. 540–551.
4. Сергеева В.М. Структура и распределение фитопланктона в глубоководных районах северной части Карского моря / В.М. Сергеева, И.Н. Суханова, Е.И. Дружкова, С.А. Мошаров, В.В. Кременецкий, А.А. Полухин // Океанология. – 2016. – Т. 56. – № 1. – С. 113–119.
5. Якушев Е.В. Гидрохимические исследования прибрежных вод архипелага Шпицберген в 2014 - 2015 гг. / Е.В. Якушев, П.Н. Маккавеев, А.А. Полухин, Е.А. Проценко, С.В. Степанова, П.В. Хлебопашев, Ш.Х. Якубов, А. Сталстрем, М. Норли // Океанология. – 2016. – Т. 56. – № 5. – С. 836–838.
6. Полухин А.А. Особенности распространения материкового стока по акватории Карского моря / А.А. Полухин, П.Н. Маккавеев // Океанология. –

2017. – Т. 57. – № 1. – С. 25–37.
7. Маккавеев П.Н. Гидрохимические особенности акватории Карского моря летом 2015 г. / П.Н. Маккавеев, А.А. Полухин, А.В. Костылева, Е.А. Проценко, С.В. Степанова, Ш.Х. Якубов // Океанология. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 57–66.
 8. Drits A.V. Copepods *Senecella siberica* and *Limnocalanus macrurus* in the Ob Estuary: ecology in high-gradient environment / A.V. Drits, A.F. Pasternak, A.B. Nikishina, T.N. Semenova, V.M. Sergeeva, А.А. Полухин, M.V. Flint // Polar biology. – September 2016. – Vol. 39. – Issue 9. – P.527–1538. DOI 10.1007/s00300-015-1878-6.
 9. Polukhin A. The contribution and spatial distribution of Ob and Yenisei runoff on surface layer of the Kara Sea / A. Polukhin, P. Makkaveev // Geophysical Research Abstracts. – 2012. – Vol. 14. EGU2012-1202 EGU General Assembly 2012.
 10. Полухин А.А. Распределение полей биогенных элементов в центральной части Карского моря осенью 2011 года (по материалам 59-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш») / А.А. Полухин, С.В. Степанова, А.Л. Чульцова // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием. 10–14 сентября 2012 г., г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 2012. – 465 с. – ISBN 978-5-9274-0526-8. – С. 304-308.
 11. Polukhin A. Dissolved inorganic carbon and nutrients in estuarine mixing zones of the Ob and Yenisei Rivers / A. Polukhin, P. Makkaveev // Geophysical Research Abstracts. – 2013. – Vol. 15. EGU2013-1663-5, EGU General Assembly 2013.
 12. Маккавеев П.Н. Биогенный сток с Новой Земли в Карское море / П.Н. Маккавеев, А.А. Полухин, П.В. Хлебопашев // Геология морей и океанов: Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. IV. М.: ГЕОС, 2013. 304 с. С. 97-101.

13. Кодрян К.В. Потоки биогенных элементов на границе вода-дно в Енисейском заливе (59 рейс нис «Академик Мстислав Келдыш») / К.В. Кодрян, А.Ю. Лейн, П.Н. Маккавеев, **А.А. Полухин**, А.Г. Розанов, С.В. Степанова // Геология морей и океанов: Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. IV. М.: ГЕОС, 2013. 304 с. С. 65-69.
14. Osadchiev A. Structure of the upper layer of the Kara Sea influenced by Ob and Yenisei discharge based on continuous thermohaline and optical measurements / A. Osadchiev, P. Zavialov, A. Izhitskiy, **A. Polukhin**, V. Pelevin, P. Makkaveev and Zh. Toktamysova // Geophysical Research Abstracts. – Vol. 17. EGU2015-2677, 2015 EGU General Assembly 2015.
15. **Полухин А.А.** Динамика гидрохимических характеристик поверхностного распресненного слоя Карского моря в августе-сентябре 2014 года // Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований. – М.: АПР. – 2015. – С. 58-61.
16. **Polukhin A.** Impact of continental runoff and melted sea ice on spatial distribution of carbonate parameters and nutrients in the Kara and Laptev Seas / **A. Polukhin**, A. Kostyleva, E. Protsenko, S. Stepanova, Sh. Yakubov and P. Makkaveev // Geophysical Research Abstracts. – Vol. 18. EGU2016-12067, 2016 EGU General Assembly 2016.