

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

На правах рукописи



Борисенко Геннадий Валерьевич

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОДОТОКОВ НОВОЙ ЗЕМЛИ
(КАРСКИЙ БЕРЕГ) И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ
РЕЖИМ ЗАЛИВОВ АРХИПЕЛАГА**

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии Наук.

Научный руководитель: Кандидат географических наук, **Полухин Александр Анатольевич**

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

Андреев Андрей Григорьевич, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории арктических исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова»

Защита состоится «___» _____ 2024 г. в ___ ч. ___ мин. на заседании Диссертационного совета 24.1.090.02, 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 «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н. **Соловьев Дмитрий Александрович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. В условиях меняющегося климата в последние годы в экосистеме арктических морей происходят значительные изменения: существенно сокращаются площади многолетних льдов [Vihma, 2014; Jenkins, Dai, 2021], уменьшается время ледостава и толщина сезонного ледяного покрова [Birchall, Bonnett, 2020], а также увеличивается влияния затоков атлантических водных масс [Dalpadado et al., 2014; Arrigo, van Dijken, 2015]. Сокращение ледяного покрова Арктики уменьшает альbedo земной поверхности – основную составляющую радиационного баланса Земли, возмущение которого определяет динамику планетарной климатической системы [Головко, 2012]. Радиационный форсинг приводит к освобождению шельфа от зимнего льда и увеличивает скорость отступления выводных ледников арктических архипелагов. Согласно работе [Корякин, 2013], в последние 10 лет значительно ускорилось отступление выводных ледников на архипелаг Новая Земля, сокращение площади ледников с конца 20-го века составило 1000 км^2 , а сокращение объема льда – 380 км^3 . В подобных условиях в субгляциальных областях происходит увеличение интенсивности поверхностного стока и последующей абразии берегов. Согласно существующим исследованиям [Dixon et al., 2012; Bhatia et al., 2013; Hawkings et al., 2014; Dixon, 2016; Diaz et al., 2021], отступление ледников увеличивает в реках, питаемых ледниками, концентрации биогенных соединений, а также органического вещества [Musilova et al., 2017]. Подобные изменения приводят к коренной перестройке гидрологических и, как следствие, биогеохимических условий арктической экосистемы [Franson et al., 2015; Pain et al., 2020; McGovern et al., 2020].

Эти процессы в настоящее время мало изучены для системы ледников архипелага Новая Земля и акваторий его заливов. Начатая в 2007 г. под

руководство академика М.В. Флинта программа «Экосистемы морей сибирской Арктики» [Флинт и др., 2016, 2020] позволила получить уникальные натурные данные по химическому составу стока (биогенные элементы, неорганический углерод) водотоков в некоторых заливах восточного берега Новой Земли, а также по гидрохимической структуре вод в заливах в ходе экспедиций с 2007 по 2023 гг. В работе показана связь интенсивности водотока с его химическим составом. Выделены различия влияния стока на структуру вод, связанные с типом питания и поступления в акваторию заливов. Результаты анализа этих данных впервые дали обширное представление об источниках и химическом составе стока, а также о влиянии водотоков на абиотические характеристики экосистем заливов архипелага Новая Земля.

Цель работы – выявить изменчивость гидрохимического состава водотоков и установить особенности гидрохимической структуры заливов Новой Земли (Благополучия, Цивольки, Ога, Седова, Медвежий, Абросимова, Степового) в разные годы наблюдений, а также оценить влияние водотоков на заливы и заливов на прилежащую акваторию Карского моря.

В рамках поставленной цели решались следующие **задачи**:

- Подготовка базы данных по химическому составу водотоков Новой Земли, а также гидрохимической структуре вод заливов за период 2007–2023 гг.
- Проведение повторных экспериментальных исследований по выщелачиванию биогенных элементов из горных пород с целью оценки количества поступления химических элементов в воды заливов с водотоками.
- Анализ концентраций биогенных элементов в водотоках разного типа (снежного, ледникового питания, водотоков различных размеров), выпадающих в заливы Новой Земли.

- Оценка распространения биогенного сигнала от водотоков в акваториях заливов Новой Земли, а также выявление факторов, способных оказать влияние на гидрохимическую структуру акватории заливов Новой Земли.
- Оценка возможного влияния аллохтонных биогенных элементов, поступающих в заливы Новой Земли, на прилежащие акватории Карского моря.

Научная новизна работы связана с труднодоступностью объектов исследования – заливов восточного побережья Новой Земли. Позднее освобождение заливов ото льда и сложные погодные условия приводит к тому, что период полевых работ в них, как правило, ограничен концом лета – осенью. Кроме того, для работы в большинстве заливов необходимо получение специальных разрешений Министерства обороны, а в последние годы многие заливы закрыты для исследований. Поэтому данные исследования, основанные на материалах, собранных экспедициями ИО РАН в период с 2007 по 2023 гг. в заливах Благополучия, Ога, Медвежий, Цивольки, Седова (северный остров) и Абросимова, Степового (южный остров), являются уникальными и расширяют знания о Новой Земле и Карском море. Впервые систематизированы данные по содержанию биогенных элементов в водотоках заливов Благополучия, Цивольки, Седова, Ога, Степового и Абросимова.

Научное и практическое значение исследования. Перспективно использование работы в контексте изучения климатических изменений в арктическом регионе РФ: увеличение средней температуры воздуха влечет увеличение ледникового стока, что, в свою очередь, влияет на гидрохимический режим Карского моря, делая водотоки Новой Земли важным источником биогенных элементов в западной части Карского моря. Практическая значимость диссертационной работы заключается в создании опорной базы данных для целей прогноза изменчивости экосистем арктических архипелагов России, многие из

которых являются охраняемыми природными территориями. Результаты исследований могут быть использованы как входные данные для различных модельных прогнозов влияния климатических изменений на региональные арктические экосистемы.

Методы, использованные в диссертации, являются признанными международным сообществом методиками гидрохимического анализа концентраций биогенных элементов [Современные методы..., 1992; Parsons, 2013]. Методы, использованные в экспериментальной части, описаны в работах [Маккавеев и др., 2013; Polukhin et al., 2021].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что биогенные элементы поступают в поверхностный слой заливов Новой Земли с водотоками, осуществляющими выщелачивание биогенных элементов из подстилающей породы (анкеритолитовых сланцев). Даны оценки скорости выщелачивания при разных условиях в результате лабораторных экспериментов. В составе водотоков содержится до 15 μM нитратного азота, до 80 μM растворенного кремния.

2. Впервые установлено, что основным фактором, определяющим концентрации нитратного азота и растворенного кремния в водотоках, является размер водотока – крупные водотоки содержат в среднем меньшие концентрации биогенных элементов, чем малые водотоки. Водотоки, непосредственно разгружающиеся с выводных ледников заливов Новой Земли, содержат наименьшее количество нитратного азота.

3. Для заливов Новой Земли показано, что водотоки оказывают, в целом, локальное влияние на гидрохимическую структуру акватории залива, масштабы которого различны в заливах разных типов. Расстояние, на которое

распространяется это влияние, изменяется от 1 до 5 км по концентрациям 2 μM нитратного азота, 8 μM растворенного кремния.

Достоверность полученных результатов обеспечивается: калибровкой измерительных приборов и контролем их работы в течение всего периода измерений; использованием общепринятых методик, обладающих приемлемой для обнаружения исследуемых параметров точностью. Качество результатов исследования обеспечивается статистически значимым количеством проб, контролем точности химических анализов, апробацией результатов на российских и международных конференциях.

Апробация работы. Материалы, изложенные в настоящей диссертационной работе, легли в основу докладов на конференциях EGU-2021 (Вена, Австрия, 2021, онлайн), EGU-2019 (Вена, Австрия, 2019), Комплексные исследования Мирового океана 2020-2023 (Калининград, Москва, Севастополь, Санкт-Петербург). Результаты работы представлены на заседаниях Ученого совета Физического направления, Совета молодых ученых ИО РАН (март 2022 г., апрель 2023 г.).

Личный вклад автора заключается как в непосредственном участии в сборе натуральных данных (отбор и лабораторный анализ проб) в составе 3-х экспедиций НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2018, 2019, 2023 гг.), так и в графической и статистической обработке натуральных и архивных данных, полученных Лабораторией биогидрохимии ИО РАН в период 2007–2023 гг. Была проведена значительная лабораторная работа, включающая в себя подготовку и проведение эксперимента по выщелачиванию биогенных элементов из анкеритолитовых сланцев Новой Земли. Автором проведена подготовка и апробация работы на российских и международных конференциях.

Публикации. Материалы диссертации полностью опубликованы. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК и 9 тезисов докладов на российских и международных научных конференциях.

Благодарности. Автор выражает благодарность и признательность научному руководителю, заведующему Лабораторией биогидрохимии ИО РАН Полухину А.А. за внимательное руководство работой и моральную поддержку. За ценные указания, возможность получения данных и направление научной мысли автор выражает благодарность академику Михаилу Владимировичу Флинту. Автор благодарит коллектив Лаборатории биогидрохимии: Хлебопашева П.В., Селиверстову А.М., Чульцову А.Л., Казакову У., Пронину Ю.О., Зубаревича В.Л., Степанову С.В. за полученные материалы, положенные в основу диссертационной работы; за получение сопутствующих данных и помощь в экспедиции автор благодарит Щуку А.С., Щуку С.А. За ценные замечания автор благодарит Шармара В.Н., Глуховца Д.И., Ковалева Г.А. Работа посвящается руководителю Лаборатории биогидрохимии (2000–2020 гг.) д.г.н. П.Н. Маккавееву, стоявшему у истоков представленных исследований и внесшему неоценимый вклад в формирование концепции и полученные результаты. Автор выражает благодарность своей жене и коллеге Колтовской Е.В. за всестороннюю поддержку и помощь в написании работы.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из Введения, 4-х глав, Заключение, списка использованных источников и Приложения. Полный объем диссертации – 156 страниц, включая 100 рисунков, 11 таблиц и 22 таблицы в Приложении. Список литературы насчитывает 113 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дано обоснование актуальности темы, определена основная цель исследования, перечислены поставленные задачи, основные положения,

выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, их научная и практическая значимость. Представлены личный вклад автора, апробация результатов исследования и список публикаций по теме диссертации.

В **Главе 1** выполнен обзор актуального состояния исследований по проблеме ледникового стока в арктических морях, содержатся общие географические сведения о Карском море и Новой Земле. В **разделе 1.1** приводятся сведения о биогенных элементах. Описаны формы нахождения азота, кремния и фосфора в природе, а также их связь с ледниковым стоком на примере Гренландского щита. Приводятся концентрации биогенных элементов в различных средах на примере залива Темплфьорд (Шпицберген). **Раздел 1.2** посвящен исследованиям в области выветривания горных пород и исследованиям, где изучается перенос взвешенного и растворенного вещества ледниками. Отмечается, что горные породы могут быть источником биогенных элементов в воде, например, в реках Исландии. В **разделе 1.3** приводится общая физико-географическая характеристика Карского моря, которая включает границы Карского моря, глубины, описание береговой линии и роли Карского моря в народном хозяйстве (добыча нефти). В **разделе 1.4** представлены сведения о климате Карского моря, по классификации Кёппена климат типа ET, отмечается разнообразие ветровой обстановки. В данном разделе приводятся значения средней многолетней температуры воздуха зимой и летом, а также данные об изменениях климата в регионе за последние 30 лет. **Раздел 1.5** посвящен гидрологии Карского моря (приводятся данные по температуре и солености поверхностных вод), а также закономерностям распространения обско-енисейского стока в Карском море. В **разделе 1.6** показаны основные гидрохимические особенности поверхностного опресненного слоя Карского моря. Речной сток оказывает значительное влияние на южные и западные районы Карского моря, поэтому границей выделения речных вод служит величина $10 \mu\text{M}$

растворенного кремния. Речной сток распространяется в южной части Карского моря в непосредственной близости от Обской губы, также на сток оказывает влияние господствующее направление ветра в тот или иной год. Согласно [Русанов, 1980], концентрация $10 \mu\text{M}$ кремния характерна для поверхностных вод арктического бассейна, которые находятся под влиянием речного стока. В **разделе 1.7** приводится географическое описание Новой Земли, её климата, рек архипелага. В **разделе 1.8** дано геологическое описание Новой Земли, горных пород, слагающих берега Новой Земли. **Раздел 1.9** посвящен физико-географическому описанию заливов Новой Земли, гидрохимические характеристики которых исследуются в настоящей диссертации. Представлены заливы Благополучия, Седова, Ога, Цивольки, Медвежий, Степового, Абросимова. Водотоки в заливах делятся на 3 группы: 1) водотоки, которые имеют водосборную площадь и ледниковое питание; 2) водотоки, текущие непосредственно с ледника; 3) водотоки, имеющие снежное питание, временные. Карта расположения заливов представлена на рис. 1. **Раздел 1.10** содержит кратко сформулированные выводы по **Главе 1**.



Рисунок 1 — Исследуемые заливы Новой Земли

В **Главе 2** дано описание материалов и методических подходов к измерениям и обработке данных, используемых в работе. В **разделе 2.1** представлена информация о материалах работы – полевых данных, полученных в ходе 9 экспедиций. Пробы воды отбирались во время высадок на берег и на ходу судна при помощи пластиковых батометров. Было отобрано 248 станций, проведено более 5000 гидрохимических анализов воды как в водотоках, так и в толще воды. В **Разделе 2.2** описаны методики отбора и консервации проб воды, руководящие документы для подготовки посуды, регламент анализов. Уделяется внимание точности методов и подчеркивается, что такая точность приемлема для изучаемых явлений. Описывается метод измерения общей щелочности (метод

Бруевича), методика определения нитратной и нитритной форм азота, методика определения растворенного кремния. Изложена методика проведения эксперимента по выщелачиванию биогенных элементов из горных пород.

Образец исследуемой горной породы помещался в 5-литровую емкость, наполненную дистиллированной водой, и выдерживался при температуре 4°C. Для предотвращения микробиологической деятельности образцы обрабатывались раствором сулемы (0.3 г/л). С интервалом в 1 неделю проводились измерения концентраций растворенного кремния, нитратного азота и неорганического фосфора. При пробоотборе учитывалась потеря объема отбираемой воды при каждой итерации измерений.

В работе используются данные по пространственному распределению хлорофилла А на основе дистанционного зондирования, содержащиеся в Атласе оптических характеристик, разработанном в Лаборатории оптики океана ИО РАН. **В разделе 2.3** приведены выводы по **Главе 2**.

В **Главе 3** приведены результаты экспериментальных измерений скорости выщелачивания биогенных элементов из горных пород, слагающих берега Новой Земли, а также данные по гидрохимическому составу воды водотоков Новой Земли. **Раздел 3.1** посвящен экспериментальному изучению возможности выщелачивания биогенных элементов. Приводится краткая литературная основа выполненных работ с указанием близких по тематике работ, подробно раскрывается методика эксперимента. Приводится описание горных пород различных типов, их морфологии и состава. Лабораторией гидрохимии было проведено несколько экспериментов (в 2014, 2016, 2017, 2022 годах). Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты экспериментов по выщелачиванию биогенных элементов из горных пород Новой Земли

Образец	$\mu\text{M-Si}^*\text{м}^2/\text{сутки}$	$\mu\text{M-PO}_4^*\text{м}^2/\text{сутки}$	$\mu\text{M-NO}_3^*\text{м}^2/\text{сутки}$
Сланец Новая Земля, контактировавший с морем, 2014 год, температура проведения 4 °С	5	0.1	2.75
Сланец Новая Земля, контактировавший с морем, 2016 год, температура проведения 20 °С	3.4–5.9	0.19	–
Сланец Новая Земля, контактировавший с морем, 2017 г., температура проведения 4 °С (Ac1)	2.36	0	0.96
Сланец Новая Земля, не контактировавший с морем (2 км от моря), 2017 г., температура проведения 4 °С (Ac2)	3.15	0	0.32
Сланец Новая Земля, 2 км от моря, 2022 г., температура проведения 4 °С	1.6 ± 0.1	0	0.4 ± 0.05

Горные породы, слагающие берега з. Благополучия и представляющие собой анкеритолитовые сланцы, могут являться источником нитратного азота и растворенного кремния в водотоках. Это было показано экспериментально в 2014, 2016, 2017, 2022 гг.

Из образцов анкеритолитовых сланцев наблюдается эмиссия растворенного кремния (Si) на уровне 1.6–1.9 $\mu\text{M-Si}^*\text{м}^2/\text{сутки}$ и нитратного азота (NO_3^-) на уровне 1.45 $\mu\text{M-NO}_3^*\text{м}^2/\text{сутки}$; эмиссии фосфатов не наблюдается. При

низких температурах проведения эксперимента интенсивность выщелачивания биогенных элементов ниже.

В разделе 3.2 приводятся данные концентраций растворенного кремния и нитратного азота в зависимости от типа питания и водосборной площади водотоков изучаемых заливов. Диапазоны величин концентраций растворенного кремния и нитратного азота в заливе Благополучия приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Диапазоны концентраций биогенных элементов в водотоках в разные годы наблюдений в з. Благополучия

Год измерений	Диапазон величин концентраций NO_3^- , среднее значение	Диапазон величин концентраций Si, среднее значение,	Дата отбора проб
2007	1.12–8.82, 2.93 μM	28–36, 32.6 μM	13–15.09
2013	3–4.48, 3.7 μM	6–42, 29 μM	13–16.09
2014	3–8, 5.25 μM	7–27, 14.4 μM	29–31.08
2016	0.6–10.8, 6.5 μM	2.9–36.74, 27.5 μM	31.07–02.08
2017	1–11, 5.46 μM	2–46, 26 μM	25–26.09
2018	0.14–11.2, 3.27 μM	10–46, 19.3 μM	09–11.09
2020	2.5–5.19, 3.5 μM	1.6–6.93, 3.1 μM	07–10.09

По всем годам наблюдений в заливе Благополучия (2007, 2013–2018 гг.) была построена диаграмма щелочности-кремния, приведенная на рисунке 2. Установлено, что ручьи в среднем содержат большие концентрации кремния (более 20 μM) и большую щелочность (более 2000 μM), чем крупные реки.

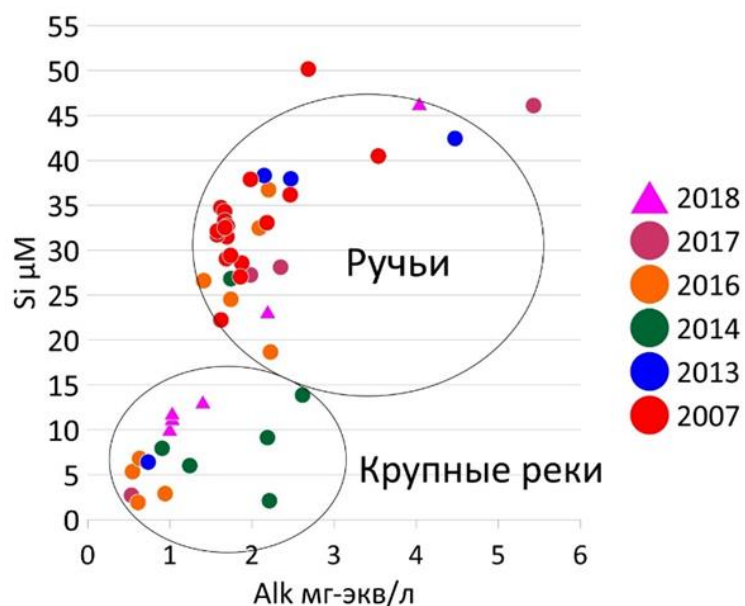


Рисунок 2 — Диаграмма щелочности-кремния для водотоков з. Благополучия (2007–2018 гг.)

На рисунке 3 представлено распределение концентраций растворенного кремния и нитратного азота (μM) в водотоках з. Благополучия в 2018 г. В ходе высадок были отобраны пробы воды из водотоков различного питания: 1) из крупных водотоков, имеющих некоторую водосборную площадь и питаемых ледником, и из мелких водотоков, имеющих снеговое питание. На рисунке в бухту Укромная впадает крупная река Укромная, также к этому типу водотоков относится ручей Базовый в северо-восточной части з. Благополучия, во всех представленных случаях наблюдается в 3 раза меньшая концентрация растворенного кремния ($11 \mu\text{M}$) и почти в 4 раза меньшая концентрация нитратного азота ($0\text{--}2 \mu\text{M}$), чем в водотоках снегового питания (в центральной части з. Благополучия).

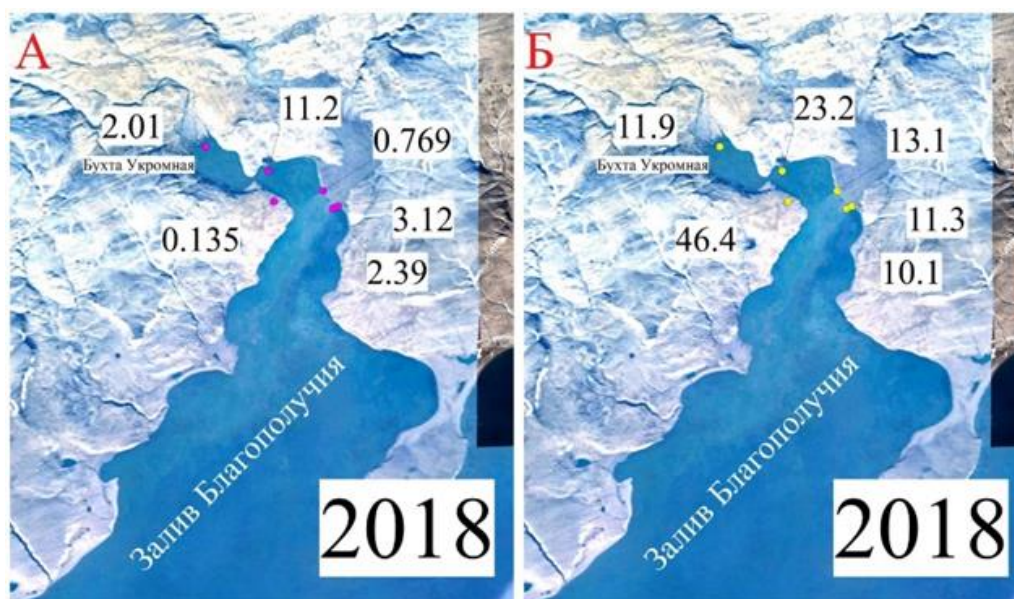


Рисунок 3 — Пример карты концентраций (μM)растворенного кремния (А) и нитратного азота (Б) в з. Благополучия в 2018 г.

Также в **разделе 3.2** приводятся данные концентраций нитратного азота и растворенного кремния в водотоках з. Седова, Цивольки, Ога, Медвежий, Степового, Абросимова. Во всех представленных заливах существуют различия в концентрациях биогенных элементов, связанные с типом питания и размером водотока. Воды временных и малых водотоков в большей степени контактируют с ранее не выщелоченными горными породами и в среднем содержат в 2 раза больше биогенных элементов, чем крупные и постоянно текущие водотоки. Это было показано на примере з. Благополучия: мелкие ручьи содержат в среднем 20–40 μM растворенного кремния и обладают сравнительно большей щелочностью (более 2500 μM), чем крупные реки. Концентрация нитратного азота в крупных и мелких реках была также различна: как правило, в мелких реках, имеющих ледниковое питание, наблюдаются концентрации нитратного азота 5 μM и более.

В разделе 3.3 дана сравнительная характеристика водотоков в заливах с выводным ледником. Как правило, такие водотоки содержат высокие концентрации кремния и практически не содержат нитратного азота. На примере водотоков заливов с выводным ледником (Медвежий, Ога, Цивольки) показано,

что водотоки, имеющие ледниковое питание и разгружающиеся с выводного ледника, содержат до 10–15 μM силикатов, до 5 μM нитратного азота. Также, на примере з. Ога в 2015 и 2016 гг., было показано влияние сезонной составляющей на сток мелких рек с ледника. Пробы, отобранные в конце арктического лета (2015 г.), содержат в 4 раза больше растворенного кремния (35 μM против 9 μM) и в 2 раза больше нитратного азота (4 μM против 2 μM).

Раздел 3.4 посвящен сравнительной характеристике заливов о. Южный (з. Абросимова и з. Степового). Концентрации биогенных элементов для заливов о. Южный (з. Абросимова, з. Степового) были наибольшими: достигали 80 μM для кремния, 30 μM для нитратного азота, для водотоков о. Северный – 6–12 μM силикатов, 5–10 μM нитратов. Возможной причиной различия концентраций биогенных элементов в водотоках заливов о. Южный и заливов о. Северный являются различия в характере водосборной площади, отсутствие ледника и более длительный теплый период в з. острова Южный. В отличие от заливов о. Северный, влияние фактора сезонности в заливах о. Южный было меньшим: в з. Абросимова, например, концентрации биогенных элементов в водотоке были высокими всегда, вне зависимости от времени отбора проб.

В разделе 3.5 приведены выводы по **Главе 3**.

В Главе 4 отражены данные по гидрохимической структуре мористой части изучаемых заливов. В **разделе 4.1** приводятся особенности гидрохимической структуры з. Благополучия в 2007, 2013–2023 гг. Этот залив наиболее полно изучен, в кутовой части залива находится бухта Укромная, которая практически полностью изолирована от основной части залива. Наблюдалось 2 типа структуры поверхностного слоя: 1) в верхней части водной толщи находятся воды с соленостью более 32 PSU, содержащие низкие концентрации нитратного азота (до 0.5 μM) и низкие концентрации растворенного кремния (до 2 μM); 2) в верхнем слое находятся воды с соленостью

24–28 PSU, богатые кремнием (более 10 μM) и нитратным азотом (2 μM). Во всех случаях отмечался локальный максимум вблизи мест разгрузки водотоков в з. Благополучия, влияние водотоков собственно з. Благополучия было локальным и ограничивалось расстоянием 1–2 км, выделялись границы речных вод по показателю удельной щелочности. В годы, когда отмечалось нахождение обско-енисейских вод в з. Благополучия (2014, 2022, 2023 гг.), наблюдался мощный слой опресненных вод толщиной более 40 м, содержащий до 16 μM растворенного кремния. На рисунке 4 приводится пример гидрохимических разрезов по параметрам солености, удельной щелочности, концентрации кремния и нитратного азота в з. Благополучия в 2018 г. **В разделе 4.1.** приводятся также карты из Атласа оптических характеристик Карского моря. В некоторые годы по показателю хлорофилла А со спутника можно наблюдать перемещение обско-енисейских вод в з. Благополучия в летний период.

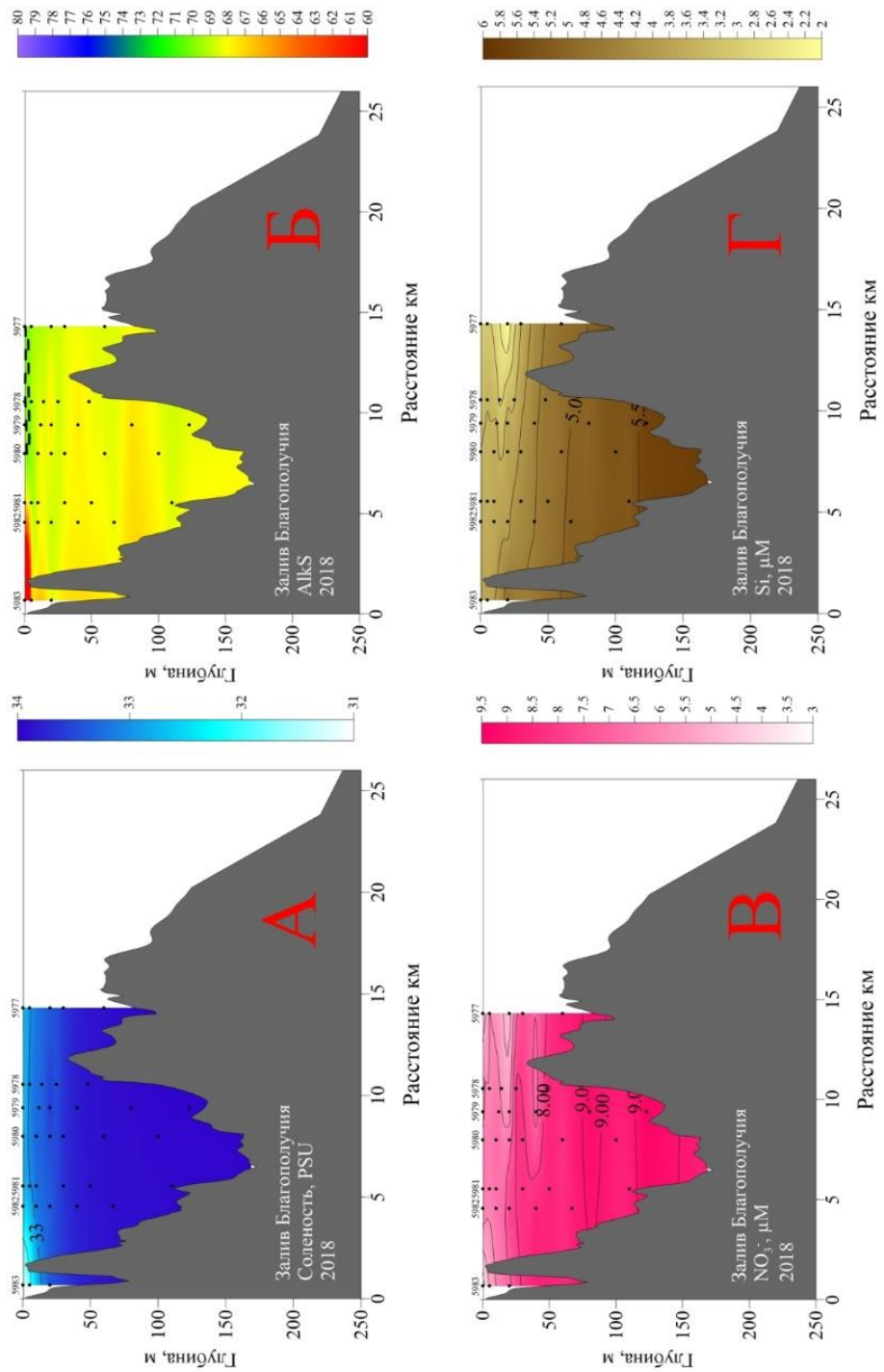


Рисунок 4 — Пример гидрохимических разрезов по параметрам солёности (А), удельной щёлочности (Б), концентрации кремния (В) и нитратного азота (Г) в з. Благополучия в 2018 г.

В разделах 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 отражены особенности гидрохимической структуры заливов Седова, Цивольки, Медвежий, Ога соответственно. В заливах, где есть выводной ледник (заливы Цивольки, Медвежий, Ога), наблюдается мощный локальный максимум концентрации растворенного кремния в непосредственной близости ледника.

В 2015 году наблюдается перемещение обско-енисейского стока в Карском море по «западному» типу, к берегу Новой Земли, что находит свое отражение в гидрохимической структуре з. Цивольки. На рисунке 5А показан продольный разрез через з. Цивольки по параметру удельной щелочности (соотношение щелочности-солености). Структура з. Цивольки в 2015 г. – двухслойная: верхний опресненный слой толщиной около 15 м имеет удельную щелочность более 70 (безразмерная величина), что объясняется влиянием обско-енисейского стока. На рисунке 5Б показана карта распространения стока Оби и Енисея в Карском море [Салинг и др., 2024].

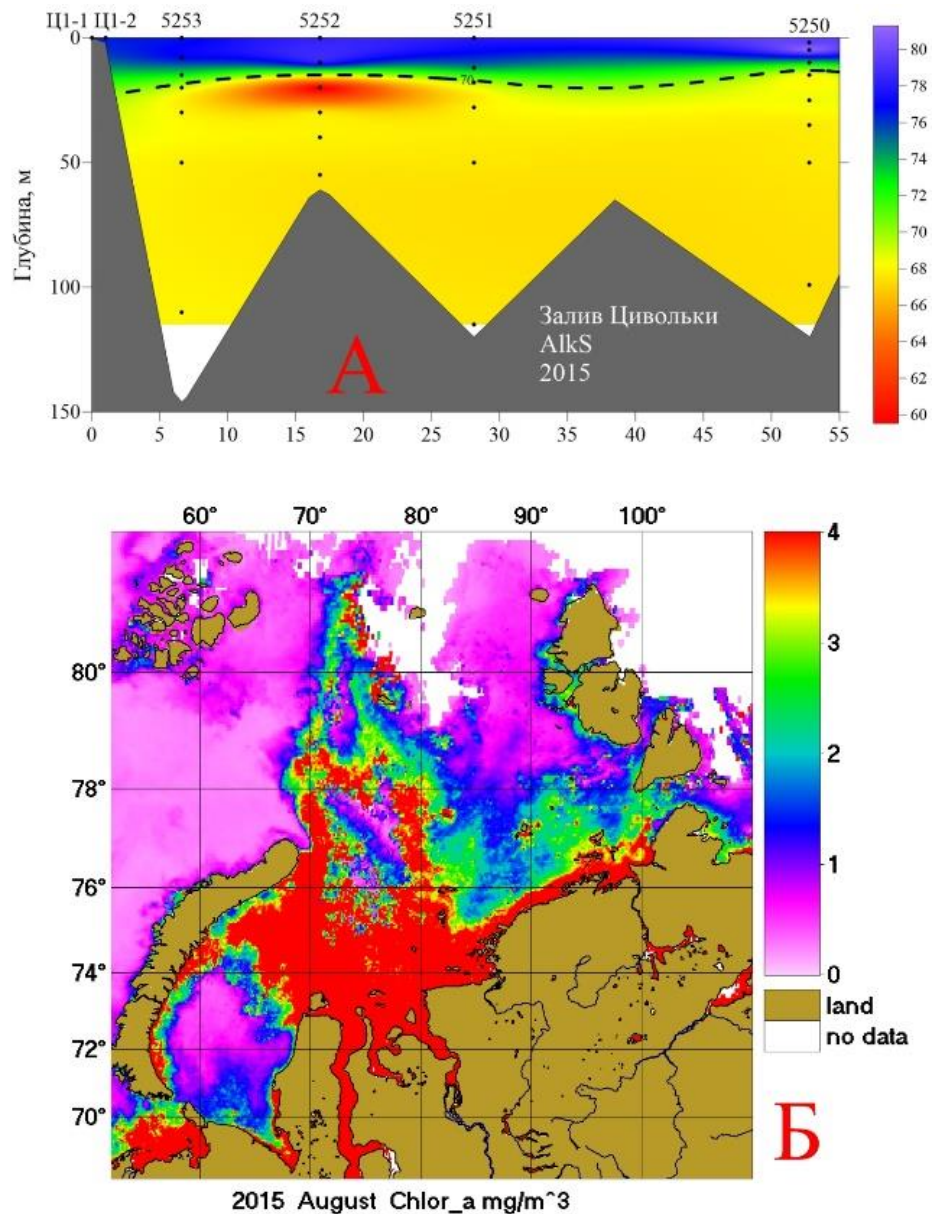


Рисунок 5 — (А) Распределение параметра удельной щелочности (безразмерная величина) на продольном разрезе в з. Цивольки в 2015 г. (Б) Распределение хлорофилла А по спутниковым данным [Салинг и др., 2024]

Разделы 4.6 и 4.7 посвящены изучению заливов о. Южный – з. Абросимова и з. Степового. Показано, что в этих заливах, несмотря на высокие концентрации биогенных элементов в водотоках, в мористой части залива биогенных элементов

практически нет. Влияния обско-енисейского стока в этих заливах не наблюдалось. В разделе 4.8 приведены основные выводы по Главе 4.

В Заключении сформулированы основные выводы исследования.

Полученные в ходе выполнения работы результаты показали химический состав пресного стока с Новой Земли, ранее практически не известный, а также его изменчивость между заливами разных типов. Экспериментальным путем было установлено, что подстилающие русла водотоков горные породы заливов Новой Земли являются одним из источников биогенных элементов в реках. Однако ввиду того, что речной сток в заливы ограничен коротким летним периодом (в среднем 2 месяца), этот источник не является определяющим для гидрохимической структуры заливов. Иными словами, влияние рек на залив локально и распространяется на величину до 5 км в верхнем слое.

Нами было показано, что заливы восточного берега острова Новая Земля открыты к водообмену с прилегающей акваторией Карского моря. В них наблюдалось влияние обско-енисейского стока, что «заглушало» сигнал собственного стока Новой Земли. В то же время заливы о. Южный Новой Земли значительно отличаются от заливов о. Северный: на них не влияет материковый сток Оби и Енисея, в водотоках содержатся относительно высокие концентрации биогенных элементов, которые при этом сохраняются исключительно в акватории заливов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. **Borisenko G.V.**, Polukhin A.A., Flint M.V. Dissolved silicon and nitrogen in glacial rivers and water of Blagopoluchia bay (Russian Arctic, Novaya Zemlya): origin, variability and spreading // Arctic and Antarctic Research. – 2023. – Vol. 69. – № 3. – P. 356–373. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-356-373>

2. Polukhin A., Makkaveev P., Miroshnikov A., **Borisenko G.**, Khlebopashev P. Leaching of inorganic carbon and nutrients from rocks of the Arctic archipelagos (Novaya Zemlya and Svalbard) // Russian Journal of Earth Sciences. – 2021. – Vol. 21. – № 4. – P. ES4002. doi:10.2205/2021ES000758

3. **Борисенко Г.В.**, Маккавеев Е.П., Стунжас П.А. Концентрация и диффузные потоки биогенных элементов в системе “поровые воды–наддонные воды” в эстуарии реки Оби // Океанология. – 2021. – Т. 61. – № 1. – С. 32–40.

Тезисы докладов на российских и международных конференциях:

4. **Борисенко Г.В.** Исследование потоков биогенных элементов в системе "илловые воды - придонный горизонт" на примере арктических морей // Комплексные исследования Мирового океана: Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых, Севастополь, 22–26 апреля 2019 года. – Севастополь: Морской гидрофизический институт РАН, 2019. – С. 311–312. – EDN YJHPIQ.

5. **Borisenko G.** The flux of the nutrients through the boundary water–sediments in Arctic seas (72 cruise RV" Akademik Mstislav Kedish") // Geophysical Research Abstracts. – 2019. – V. 21.

6. **Borisenko G.** Geographic features of the distribution of bottom fluxes of nutrients (N, P, Si) in the frontal zone of the Ob River estuary // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2020. – P. 123.

7. **Borisenko G.**, Polukhin A., Sergeeva V. Content and variability of nutrients in the water area of Blagopoluchiya Bay (Novaya Zemlya, Kara Sea) // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2021. – P. EGU21-9528.

8. **Borisenko G.** Glacial streams of the Novaya Zemlya as a source of nutrients for the Kara Sea fjords // E-Posters, ASSW 2021 (19-26 March 2021), [Электронный

ресурс], режим доступа: [//assw2021.pt/ASSW2021-Program-Theme-E-Unravelling%20Arctic%20Ecosystem%20Dynamics.pdf](http://assw2021.pt/ASSW2021-Program-Theme-E-Unravelling%20Arctic%20Ecosystem%20Dynamics.pdf)

9. **Borisenko G.V.**, Polukhin A.A., Sharmar D.V. The Hydrochemical Composition of the Watercourses of the Bay Oga, Tzivolki, Sedova (The Coast of the Kara Sea, Novaya Zemlya) // All-Russian Conference of Young Scientists" Complex investigations of the World Ocean – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. – P. 239–244.