

*На правах рукописи*



**Погожева Мария Петровна**

**ВЛИЯНИЕ БЕРЕГОВОГО СТОКА НА БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД В  
АРКТИКЕ НА ПРИМЕРЕ ЗАЛИВА ТЕМПЛФЬОРД, ШПИЦБЕРГЕН**

Специальность 1.6.17 – Океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2022

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

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
**Якушев Евгений Владимирович**

**Официальные  
оппоненты:** **Дударев Олег Викторович,**  
доктор геолого-минералогических наук, ведущий  
научный сотрудник Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Тихоокеанский  
океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии  
наук,

**Ерёмина Татьяна Рэмовна,**  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
директор Института гидрологии и океанологии  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Российский государственный  
гидрометеорологический университет»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт географии Российской академии наук

Защита состоится « » 2022 г. в час. 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:  
Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва, 117997

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

Автореферат разослан « » 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Соловьев Дмитрий Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В последние годы в Арктике происходят изменения, вызванные глобальным потеплением. Наиболее значимыми из них являются повышение температуры воды [Polyakov et al., 2005; Overland et al., 2008], уменьшение площади сезонного морского льда [Nghiem et al., 2007; Stroeve et al., 2007; Stroeve et al., 2008], увеличение речного стока в Северный Ледовитый океан [Peterson et al., 2002; McClelland et al., 2006; Nummelin et al., 2016]. Наблюдения и прогнозы показывают, что интенсификация ледотаяния в Арктике в летний период и увеличение стока рек повлияют на цикл пресной воды, что, в свою очередь, повлияет на региональный биогеохимический режим, загрязнение и продуктивность экосистем. Ожидается, что последствия увеличения содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере и повышенное поглощение CO<sub>2</sub> океанской водой наиболее активно проявятся именно в холодных и опресненных поверхностных водах Северного Ледовитого океана, приводя к снижению величины pH и асидификации (закислению) его вод [Bellerby et al., 2005; Steinacher et al. 2009]. Помимо прямого воздействия изменений pH и концентрации карбонат-ионов на морские организмы, могут быть и косвенные последствия, связанные с изменениями в биогеохимическом цикле веществ, особенно биогенных элементов и их биодоступности [Bellerby et al., 2008]. Процессы распространения, трансформации, распада и накопления загрязняющих веществ, таких как тяжелые металлы, в Арктике также связаны с вышеперечисленными факторами. При этом особую озабоченность вызывают некоторые формы тяжелых металлов, распространяющиеся по пищевой сети в арктических районах, например, биоаккумулятивная форма ртути (Hg), метилртуть (MeHg) [Rigét et al., 2007]. Установлено, что, несмотря на низкую плотность населения на севере, Арктика загрязнена плавающим мусором и микропластиком [Cozar et al., 2014; Pogojeva et al., 2021; Yakushev et al., 2021].

Прибрежные арктические воды, в дополнение к процессам, происходящим в открытом море, подвержены влиянию процессов на суше и в береговой зоне, таким как таяние вечной мерзлоты, береговая абразия, таяние ледников и увеличение пресноводного стока. В ряде работ исследуются последствия таяния мерзлоты и высвобождения метана на свойства морской воды [Semiletov et al., 2007; Vonk et al., 2012; Semiletov et al., 2012; Tesi et al., 2017; Shakhova et al., 2019]. Необходимо отметить, что при таянии вечной мерзлоты наряду с органическим веществом высвобождаются загрязняющие вещества, такие как тяжелые металлы, включая ртуть. Исследованию влияния ледников на химические свойства воды посвящены работы [Fransson et al., 2015; McGovern et al., 2020].

Особый интерес вызывают фьорды, характерные для побережья Скандинавии, Новой Земли, Гренландии, Шпицбергена и ряда других районов Арктики. Исследования во фьордах Гренландии и Шпицбергена показывают, что талые ледниковые воды, выносят в поверхностный слой моря биогенные элементы и другие химические вещества с более глубоких горизонтов [Straneo et al., 2012; Halbach et al., 2019; Hopwood et al., 2020]. Фьорды западного побережья острова Западный Шпицберген подвержены влиянию теплых и соленых морских вод, которые смешиваются с пресным речным и ледниковым стоком, а также опресняются тающим льдом, формируя специфические биогеохимические условия в поверхностном слое вод фьордов [Fransson et al., 2020].

Сложные природные условия, связанные с сезонным покровом морского льда в Северном Ледовитом океане, затрудняют экспедиционные исследования, поэтому количество данных, собранных для изучения биогеохимических параметров и загрязнителей в окружающей среде Арктики, весьма ограничено. Анализ загрязняющих веществ также ограничен из-за их низких концентраций в изучаемых компонентах природной среды, таких как морская вода, лед и снег. Особенно мало материала накоплено по прибрежной зоне, для которой

отсутствуют комплексные наблюдения, выполненные по согласованным методикам.

С учетом вышеизложенного, проблема изучения биогеохимического режима и загрязнителей арктических прибрежных вод является чрезвычайно актуальной. Необходимо также отметить, что такие исследования в России и других странах на данный момент носят единичный характер из-за сложности организации работ, особенно в зимний период времени.

**Целью** настоящей работы является оценка современного биогеохимического режима (характерный диапазон изменения концентраций, сезонная изменчивость) и степени загрязнения тяжелыми металлами арктических фьордов, подверженных влиянию речного стока и таяния ледников на примере залива Темплфьорд, арх. Шпицберген.

Достижение цели исследования предполагает решение следующих **задач**:

- Проанализировать концентрации биогенных элементов в различных компонентах природной среды Арктики (снег, морской лед, пресноводный лед, лед айсберга, морская вода, речная вода, донные отложения);
- Получить оценки сезонной изменчивости биогеохимических характеристик прибрежных вод;
- Оценить влияние берегового стока и таяния ледника на биогеохимические свойства морской воды, выявить параметры, являющиеся наиболее подходящими индикаторами речных и ледниковых вод;
- Исследовать уровень химического загрязнения различных компонентов природной среды Арктики (снег, морской лед, пресноводный лед, лед айсберга, морская вода, донные отложения);
- Исследовать влияние деградации вечной мерзлоты на изменение содержания в морской воде биогенных элементов и загрязнителей на примере тяжелых металлов.

**Научная новизна.** Впервые определены биогеохимические параметры и содержание загрязнителей в арктической природной среде по согласованным методикам отбора и анализа.

Впервые показаны отличия сезонной изменчивости биогеохимических процессов в районах, подверженных влиянию ледника относительно фоновых районов.

На основании натуральных экспериментов впервые получено качественное описание процесса высвобождения биогенных элементов и тяжелых металлов в результате абразии берегов и растворения вечной мерзлоты в морской воде.

В результате исследований сформулированы следующие **основные положения, выносимые на защиту:**

- На основе унифицированных методов отбора и анализа проб определены характерные концентрации биогенных элементов в компонентах природной среды: снеге, пресном льду, морском льду, ледниковом льду, вечной мерзлоте, донных осадках.
- Установлены диапазоны сезонной изменчивости биогеохимических параметров в арктических прибрежных поверхностных водах. Установлено, что наибольшие изменения происходят в поверхностном опресняющемся слое, а наиболее качественными индикаторами речных и ледниковых вод являются щелочность и концентрация растворенной кремнекислоты;
- По химическим характеристикам таяние ледника прослеживается как летом, так и зимой подо льдом. Ледниковый плюм (талые ледниковые воды, образуемые в нижней части ледника и поднимающиеся к поверхности) четко идентифицируется по биогеохимическим характеристикам.
- Абразионное разрушение берегов и последующая деградация вечной мерзлоты служат важным источником поступления биогенных соединений и приводят к увеличению общих фоновых концентраций тяжелых металлов в морской воде, что является естественным

процессом, не связанным напрямую с человеческой деятельностью, но может добавляться к их антропогенному поступлению и оказывать влияние на прибрежные экосистемы.

- Деградация вечной мерзлоты оказывает существенное влияние на гидрохимические свойства прибрежных морских вод, в то же время вклад этого процесса при сопоставлении с другими источниками в масштабах всей Арктики представляется незначительным.

**Достоверность научных результатов и выводов работы** обеспечивается использованием для получения натуральных данных современного высокоточного измерительного оборудования и методик; сравнением полученных результатов измерений с историческими массивами данных; соответствием полученных результатов имеющимся литературным данным. Определенной гарантией достоверности и новизны научных результатов работы является их публикация в рецензируемых зарубежных и российских журналах и презентациях на научных конференциях.

**Методология и методы исследования.** Анализы на биогеохимические параметры выполнялись в лаборатории биогидрохимии ИО РАН и Норвежском институте водных исследований (НИВА) в Осло, анализы на тяжелые металлы проводились в Государственном океанографическом институте (ГОИН) в Москве, НИВЕ и в НПО «Тайфун» (Обнинск) [Руководство..., 1993; Grasshoff et al., 2007]. Все эти организации имеют необходимые лицензии и области аккредитации для выполнения заявленных анализов, проходят регулярные интеркалибрации.

**Научная и практическая значимость работы** определяется ее существенным вкладом в понимание гидрохимических процессов, влияющих на многие биологические и геохимические аспекты существования экосистем в прибрежных морских акваториях в Арктике. Полученные результаты могут быть использованы на практике для совершенствования научных основ и методов обеспечения хозяйственной деятельности в прибрежных морских

акваториях, а также для создания практических методик оценки, мониторинга и прогноза экологической обстановки в Арктике.

**Личный вклад автора** заключается в том, что М.П. Погожева участвовала в работе 2-х научно-исследовательских экспедиций на Шпицберген, в ходе которых были получены натурные данные, использованные в диссертационной работе; проводила обработку и первичный анализ полученных данных. Совместно с коллегами писала статьи для ведущих зарубежных и отечественных журналов, а также представляла результаты работы на семинарах, коллоквиумах, российских и международных научных конференциях.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены на заседаниях Ученого совета Физического направления Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (15 апреля 2021 г. и 24 сентября 2021 г.), а также на многочисленных российских и международных конференциях: Шпицбергенских научных конференциях (Svalbard Science Conferences) в Осло, Норвегия (2017, 2019 гг.); XXII, XXIII Международных научных конференциях по морской геологии в Москве (2017, 2019 гг.); VI, VII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (2017, 2020 г.)» в Москве, III, IV, V Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» в Санкт-Петербурге (2018 г.), Севастополе (2019 г.), Калининграде (2020 г.); VII Всероссийской конференции по прикладной океанографии в Москве (2019 г.); Международной научной конференции «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики» в Санкт-Петербурге (2020 г.); Генеральной ассамблее Европейского геофизического союза в Вене, Австрия (2020, 2021 гг.), II Всероссийской научной конференции с международным участием «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны» (2020 г.), Арктическом научном саммите в Лиссабоне, Португалия (онлайн) (2021 г.).



**Публикации.** Материалы диссертации полностью изложены в работах, опубликованных соискателем. Всего по материалам исследования опубликовано 6 статей, в том числе 4 статьи в рецензируемых международных журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьи в изданиях, не входящих в перечень ВАК, 3 главы в монографиях в соавторстве, одна монография и 25 тезисов докладов на российских и международных научных конференциях.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных литературных источников и приложения. Объем работы составляет 101 страницу, включая 40 рисунков и 13 таблиц. Библиографический список включает в себя 154 наименования, в том числе 133 на иностранных языках.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Е.В. Якушеву за внимательное научное руководство и поддержку на всех этапах работы. Автор искренне благодарит коллектив Лаборатории биогидрохимии, в особенности д.г.н. П.Н. Маккавеева и к.г.н. А.А. Полухина за плодотворное сотрудничество, а также весь коллектив Института океанологии за интерес к исследованию автора и дружественную атмосферу в морских экспедициях. Автор выражает признательность чл.-корр. РАН, д.г.н. П.О. Завьялову, чл.-корр. РАН д.г.н. И.П. Семилетову, д.ф.-м.н. А.Г. Зацепину, к.г.-м.н. Н.А. Беляеву и д.ф.-м.н. А.А. Осадчиеву за плодотворное обсуждение результатов работы и конструктивные замечания.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлена общая характеристика работы, включающая обоснование актуальности темы, основную цель исследования, поставленные задачи, основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, научную и практическую значимость, личный вклад автора и апробацию результатов исследования.

В **Главе 1** содержится обзор литературы по современному состоянию знаний о биогеохимическом режиме и загрязнении Северного Ледовитого океана и арх. Шпицберген. Описываются результаты исследований биогеохимической структуры (**раздел 1.1**), асидификации (**раздел 1.2**), поступления загрязняющих веществ в Арктику (**раздел 1.3**), приводится общая физико-географическая характеристика арх. Шпицберген (**раздел 1.4**) и обзор исследований (**раздел 1.5**). Благодаря теплоте Западно-Шпицбергенскому течению климат архипелага мягче других территорий Арктики на той же широте, а акватория к западу от островов является самой северной незамерзающей частью океана в Арктике. В то же время выполняемые исследования содержания загрязняющих веществ на Шпицбергене могут отражать процессы во всей Арктике [Гордеев и др., 2011]. Загрязняющие вещества часто поступают в Северный Ледовитый океан из источников, находящихся далеко за пределами Арктического региона, за счет дальнего переноса с воздушными, морскими и речными потоками. Они имеют свойство накапливаться в продуктах питания и традиционных кормах, что создает опасность для здоровья населения и является предметом беспокойства всех арктических государств. На арх. Шпицберген представлены все компоненты природной среды Арктики (морская и речная вода, снег, многолетняя мерзлота, донные отложения, лед различного происхождения, включая ледники), а проведению исследований способствует относительно легкая транспортная доступность (по сравнению с другими арктическими районами) и развитая научная инфраструктура.

В **Главе 2** приводятся описание района исследования, методов и результатов, касающейся пространственной и временной (сезонной) изменчивости биогеохимических характеристик водной толщи. В **разделе 2.1** сообщается, что исследования проводятся в заливе Темплфьорд, который находится внутри более крупного залива Исфьорд в западной части острова Западный Шпицберген, входящего в архипелаг Шпицберген, расположенного на границе между Баренцевым, Норвежским и Гренландским морями и Северным Ледовитым океаном (рисунок 1). Всего в рамках данной работы было выполнено 6 экспедиций в период с 2011 по 2018 годы в разное время года.

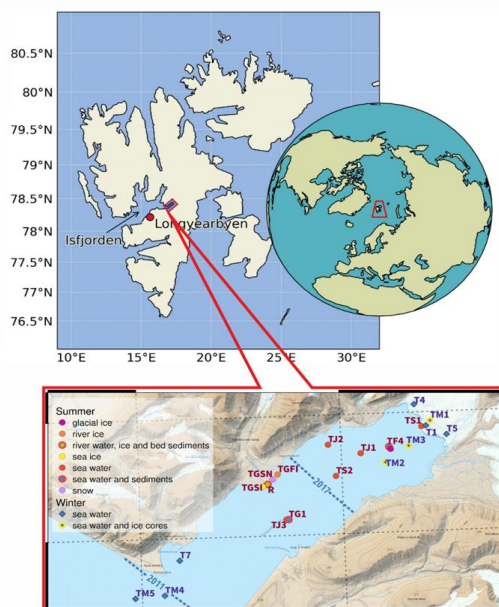


Рисунок 1. Расположение станций отбора проб в экспедициях в феврале 2011 г. (T1, T4, T5, T7), сентябре 2011 г. (TS1, TS2), марте 2014 г. (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5), июне 2015 г. (TJ1, TJ2, TJ3) и июне 2017 г. (TG1). Зимние экспедиции показаны синими точками, летние – красными

**Раздел 2.2** посвящен материалам и методам проведения анализов, а **разделы 2.3, 2.4** - полученным результатам и их обсуждению. В целом показано, что сезонные изменения биогеохимических параметров подвержены влиянию сезонного формирования термохалинной стратификации, берегового стока и процессов развития и разложения органического вещества (рисунок 2-5) [Погожева и др., 2018; Pogojeva et al., 2022]. Влияние ледника

прослеживается начиная с поздней зимы (март) в течение всего года по показателям солености, щелочности и в особенности высокой концентрации силикатов ( $>40 \mu\text{M}$ ) в наблюдаемых локальных максимумах в различных местах и на разных глубинах, что может быть связано с высокой неоднородностью ледникового плюма.

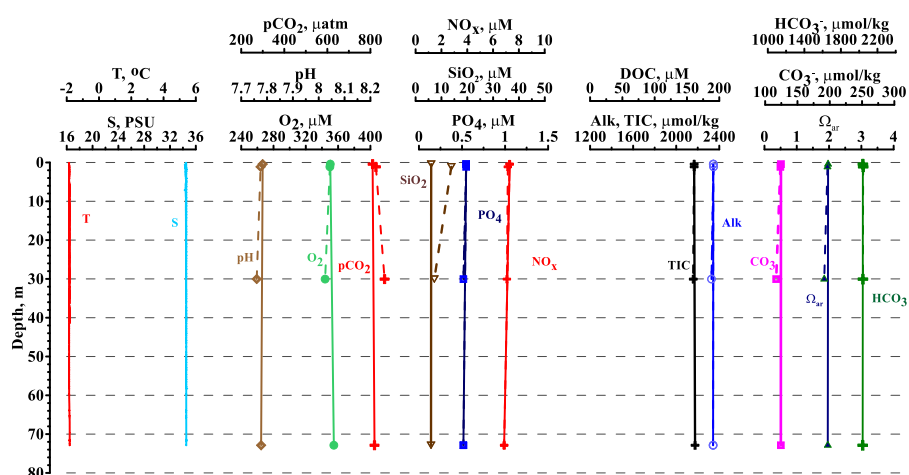


Рисунок 2. Вертикальное распределение температуры,  $T$ , солености,  $S$ , pH, растворенного кислорода,  $O_2$ , фосфатов,  $PO_4$ , нитратов,  $NO_x$ , растворенной кремнекислоты,  $Si$ , щелочности,  $Alk$ , растворенного неорганического углерода,  $TIC$ , карбонатов,  $CO_3$ , парциального давления  $CO_2$  ( $pCO_2$ ) и насыщения арагонитом ( $Arag.Sat.$ ) на станции около ледника T1 (пунктирной линией) и на выходе из фьорда T7 (сплошной линией) 19.02.2011

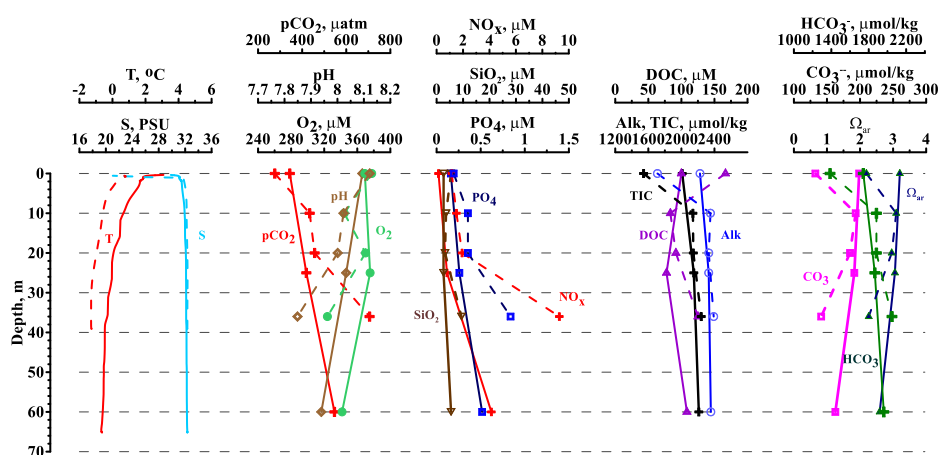


Рисунок 3. Вертикальное распределение температуры,  $T$ , солености,  $S$ , pH, pH, растворенного кислорода,  $O_2$ , фосфатов,  $PO_4$ , нитратов,  $NO_x$ , растворенной кремнекислоты,  $Si$ , щелочности,  $Alk$ , растворенного неорганического углерода,  $TIC$ , карбонатов,  $CO_3$ , парциального давления  $CO_2$  ( $pCO_2$ ) и насыщения арагонитом ( $Arag.Sat.$ ) на станции около ледника TJ1 (пунктирной линией) и на выходе из фьорда TJ3 (сплошной линией) 17.06.2015

Речной плюм идентифицируется на расстоянии в 1,5-2 км от устья реки лучше всего по низким значениям щелочности и высокой концентрации силикатов (рисунок 4).

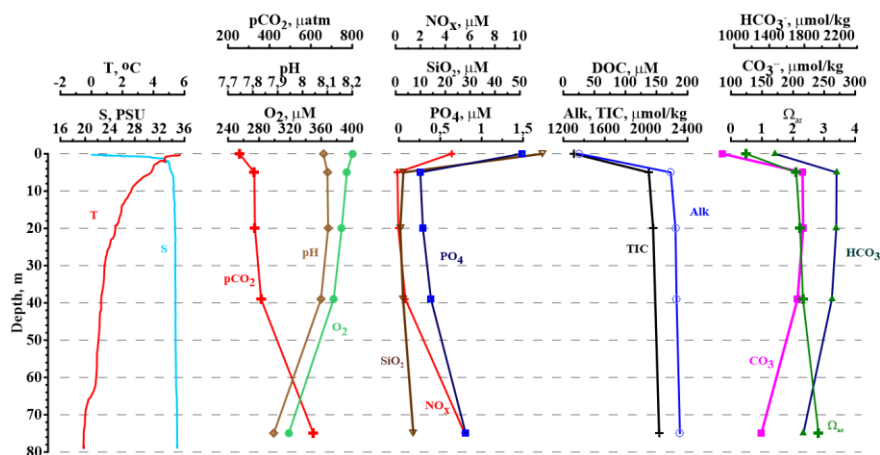


Рисунок 4. Вертикальное распределение температуры,  $T$ , солёности,  $S$ , pH, pH, растворенного кислорода,  $O_2$ , фосфатов,  $PO_4$ , нитратов,  $NO_x$ , растворенной кремнекислоты,  $Si$ , щелочности,  $Alk$ , растворенного неорганического углерода,  $TIC$ , карбонатов,  $CO_3$ , парциального давления  $CO_2$  ( $pCO_2$ ), и насыщения арагонитом ( $Arag.Sat.$ ) на станции TG1 (12.06.2017).

На Шпицбергене растворенная кремнекислота представляется лучшим индикатором для речных и талых ледниковых вод, что связано с высокой концентрацией этого элемента в подстилающих коренных породах. Биогеохимический режим у ледника отличается от аналогичных характеристик на выходе из фьорда. У ледника наблюдается более высокая биологическая продуктивность, связанная с поступлением биогенных веществ с талой ледниковой водой, более выраженной асидификацией (более низким насыщением воды арагонитом  $\Omega_{ar}$ ) и более быстрым восстановлением содержания биогенов после летних вспышек цветения (сентябрь). Азот является лимитирующим элементом для фотосинтеза, значения нитратов низкие как на выходе из фьорда, так и у ледника (рисунок 5).

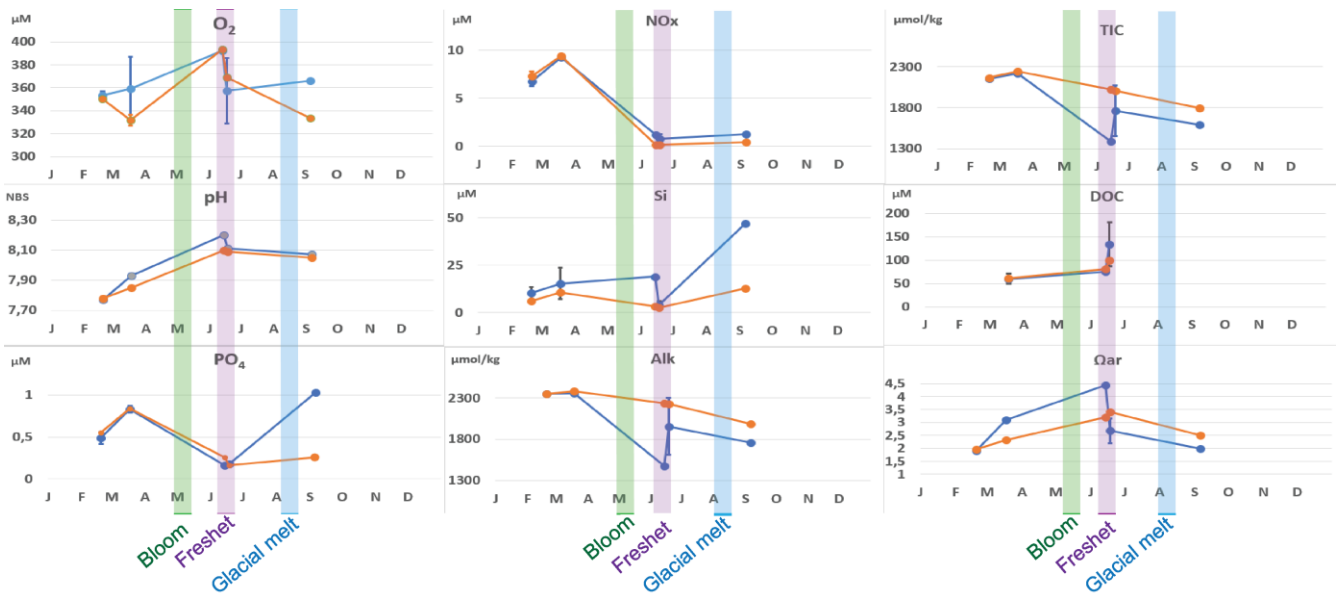


Рисунок 5. Сезонные изменения концентраций биогеохимических параметров в поверхностном слое у ледника (синяя линия) и на выходе из Темплфьорда (оранжевая линия), обнаруженные с февраля по сентябрь в экспедициях 2011-2017 гг. Точками отмечено время отбора проб. Вертикальная цветная линия показывает типичное время весеннего цветения (зеленый), паводка (розовый) и таяния ледников (синий)

В **Главе 3** приводятся результаты исследования содержания биогенных элементов и ртути в компонентах арктической природной среды, таких как вода, снег, лед, донные отложения (рисунок 6-9). В **разделе 3.1** показано, что содержание биогенных элементов в различных компонентах природной среды Арктики минимально во льду (ледниковом, речном, морском), средние концентрации обнаружены в морской поверхностной, придонной и речной воде и максимальные концентрации — в многолетней мерзлоте и морских донных отложениях (рисунок 9). Донные отложения, открывшиеся для контакта с водой после отступления ледника недавно (в данном случае в 2004 г.) отличаются от донных отложений, находящихся в контакте с водой длительное время. В открывшихся донных отложениях отсутствует значительное количество органического вещества, из-за чего условия там более окислительные и, с точки зрения биогеохимического режима, они обогащены нитратами, которые не используются на денитрификацию, как это происходит в открытой части фьорда. В отличие от биогенных элементов, минимальные концентрации ртути

наблюдаются в воде, а не во льду и снеге, что связано с ее преимущественным поступлением из атмосферы.

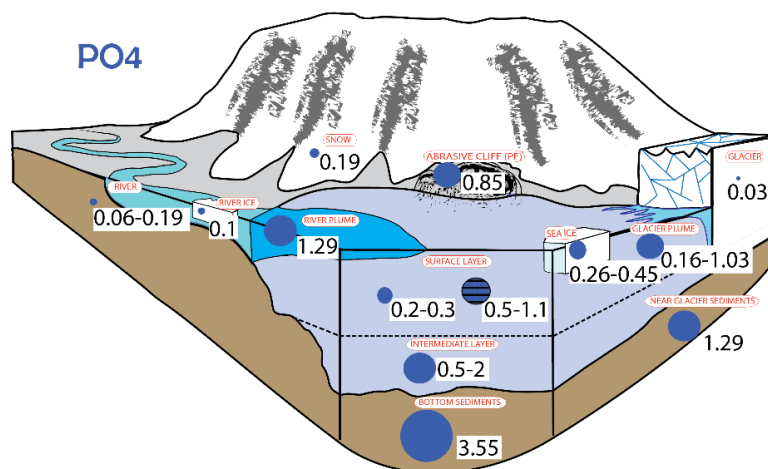


Рисунок 6. Содержание фосфатов в различных компонентах окружающей среды: морской воде, донных отложениях, речной воде, снеге, морском, речном и ледниковом льду ( $\mu\text{M}$ ). Кругами показаны относительные значения концентраций

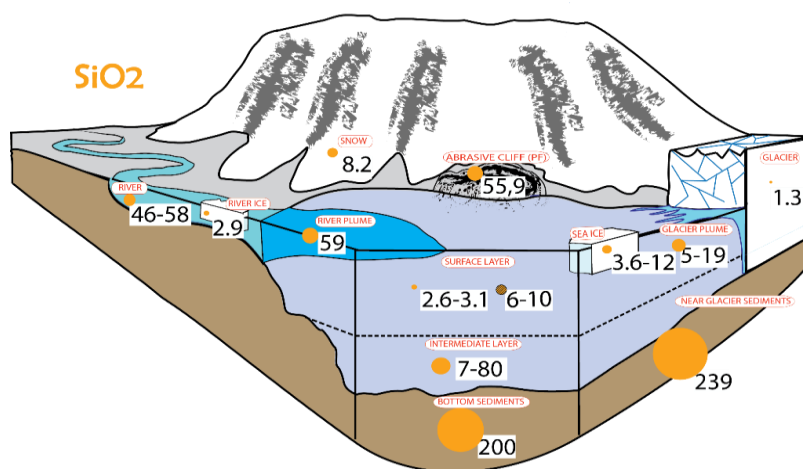


Рисунок 7. Содержание силикатов в различных компонентах окружающей среды: морской воде, донных отложениях, речной воде, снеге, морском, речном и ледниковом льду ( $\mu\text{M}$ ). Кругами показаны относительные значения концентраций

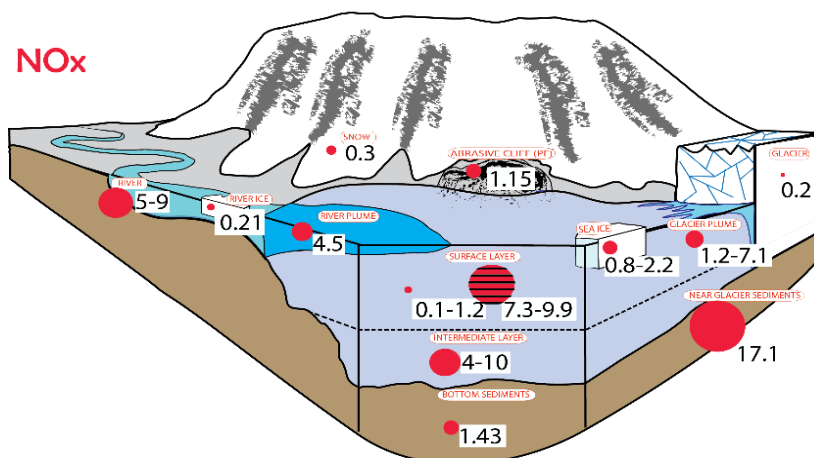


Рисунок 8. Содержание нитратов и нитритов в различных компонентах окружающей среды: морской воде, донных отложениях, речной воде, снеге, морском, речном и ледниковом льду ( $\mu\text{M}$ ). Кругами показаны относительные значения концентраций



Рисунок 9. Пирамиды иерархий для сравнения концентраций фосфатов, нитратов и растворенной кремнекислоты в следующих компонентах природной среды: морская вода, поровая вода донных отложений, речная вода, морской лед, речной лед, ледниковый лед и снег

Для общей ртути самые низкие концентрации отмечались в речной и морской воде, а не во льду и снеге, как для биогенных элементов (рисунок 10) (раздел 3.2). Это объясняется тем, что ртуть переносится воздухом и попадает на поверхность воды, земли, снега или льда преимущественно сверху. Вода, защищенная снегом и льдом, оказывается чище и обогащается ртутью при их таянии.



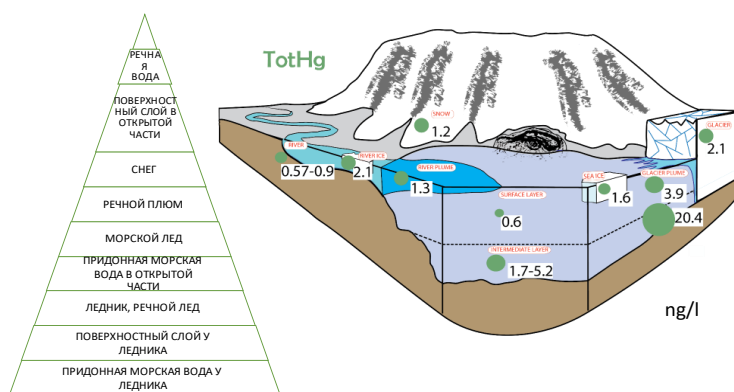


Рисунок 10. Концентрация общей ртути в различных компонентах окружающей среды, измеренная во время летних экспедиций в июне 2015-2017 гг.

В **Главе 4** приводятся результаты исследования изменения содержания химических параметров морской воды и потенциальных загрязнителей в результате контакта с вечной мерзлотой в течение первых суток. В **разделе 4.1** описан район исследований, в **разделе 4.2** – методика проведения эксперимента, а в **разделах 4.3, 4.4** результаты экспериментов и их обсуждение. В работе продемонстрировано экспериментальное подтверждение того, что основное выделение как биогенных элементов, так и загрязнителей происходит в первые часы после попадания мерзлоты в воду (рисунок 11-14).

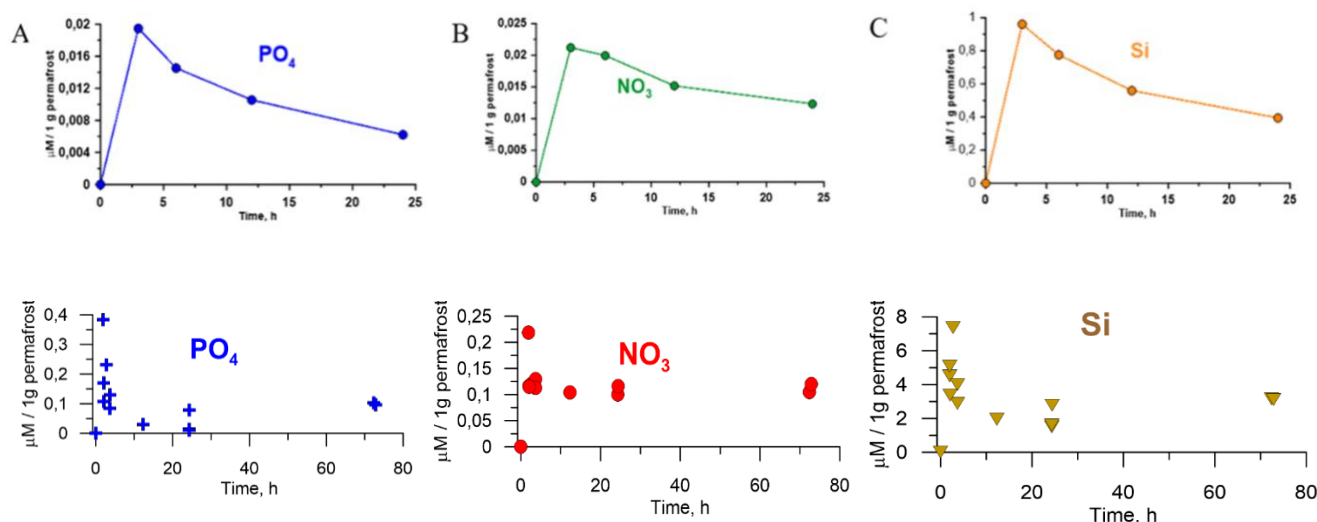


Рисунок 11. Изменения концентрации фосфатов,  $PO_4$  (A), нитратов и нитритов,  $NO_3$  (B), силикатов, Si (C) в результате таяния 1 г вечной мерзлоты в 1 л морской воды, измеренные в 2017 г. (верхний ряд) [Pogojeva et al., 2018] и в 2018 г. (нижний ряд) [Pogojeva et al., 2021]

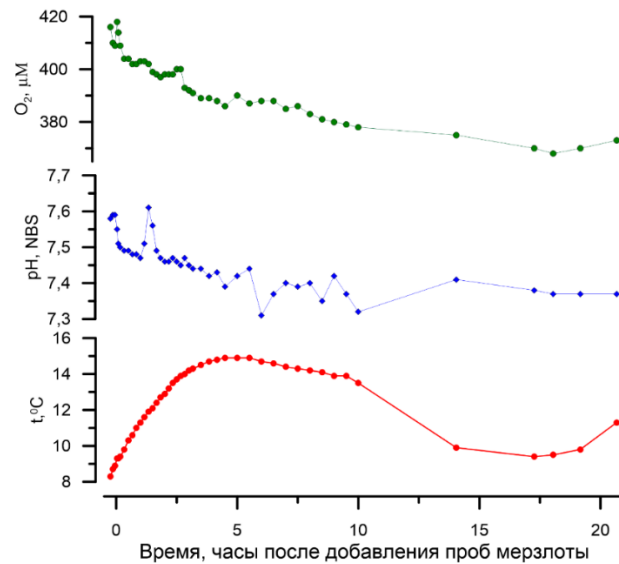


Рисунок 12. Изменения температуры, pH и растворенного кислорода, измеренные датчиками во время эксперимента 2018 г.

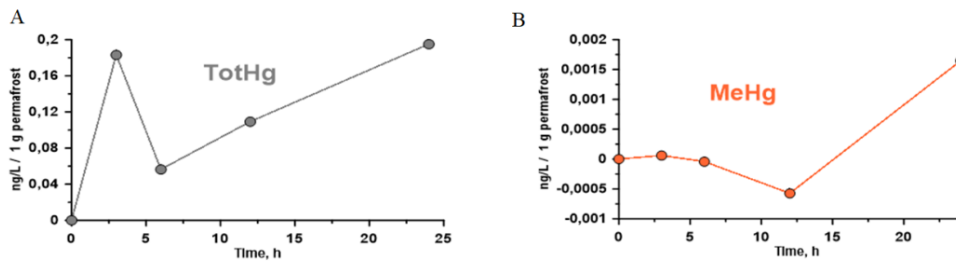


Рисунок 13. Изменения концентрации общей ртути, TotHg (A) и метилртути, MeHg (B) в результате таяния 1 г вечной мерзлоты в 1 л морской воды по данным эксперимента 2017 г.

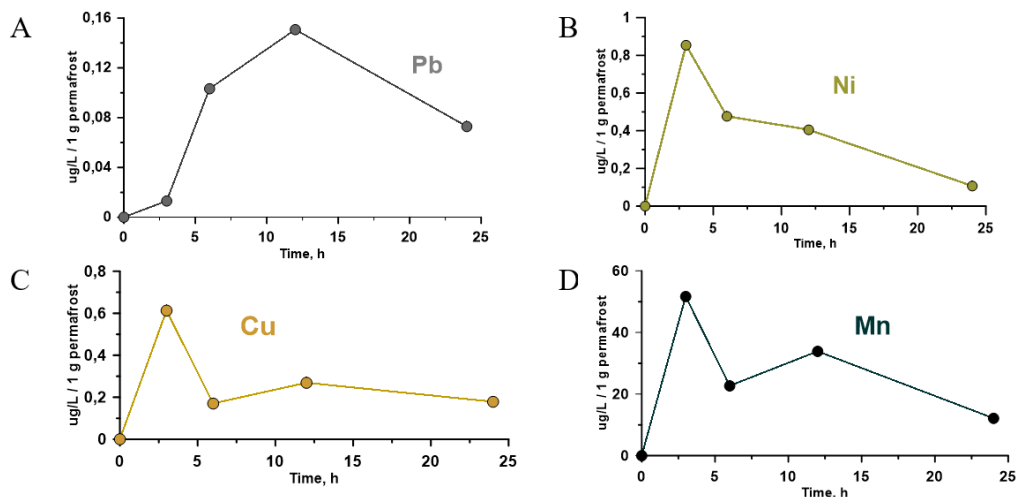


Рисунок 14. Изменения концентрации свинца Pb (A), никеля, Ni (B), меди, Cu (C), магния, Mn (D), цинка, Zn (E), кадмия, Cd (F), железа, Fe (G), алюминия Al (H) в результате таяния 1 г вечной мерзлоты в 1 л морской воды, по данным эксперимента 2017 г.

Измеренные датчиками изменения растворенного кислорода и рН позволяют оценить время интенсивного выделения в примерно 4-5 часов, после чего скорость выделения уменьшается и прекращается через 10-15 часов после начала эксперимента (рисунок 12). Биогенные элементы начинают использоваться прибрежной экосистемой уже через 3-4 часа или даже ранее. При этом происходит уменьшение содержания как органических, так и неорганических форм. В целом, результаты эксперимента демонстрируют незначительное изменение содержания биогенных элементов при таянии вечной мерзлоты с абразионных берегов для вод арктических морей в сравнении с другими источниками (реки, атмосферный перенос). В то же время в прибрежных районах процесс разрушения абразионных берегов в зоне вечной мерзлоты может оказывать существенное влияние как на загрязнение тяжелыми металлами, так и на биогеохимические процессы, что приводит к интенсификации процессов подкисления океана и истощения кислорода. Исследования были проведены лишь на одном фьорде Шпицбергена, однако, экстраполируя полученные результаты на весь Арктический регион, можно предположить существенное влияние описанных явлений по всему Арктическому побережью. В связи с продолжающимся потеплением, можно ожидать усиления исследованных последствий таяния вечной мерзлоты. В рамках всей Арктики, поступление биогенных элементов при абразии берегов с вечной мерзлотой представляется незначительным фактором, на 2-4 порядка менее интенсивным по сравнению с атмосферным переносом и речным стоком, однако может быть важным локально. Безусловно, данные исследования должны быть продолжены в аналогичных микро- и мезокосм экспериментах, желательно с большим объемом проб, и в других регионах с различающимся составом абразионного материала, содержащего мерзлоту.

**В Заключении** сформулированы основные выводы исследования:

1. Сезонные изменения биогеохимических параметров прибрежных вод определяются сезонным характером формирования термохалинной

стратификации, берегового стока и процессов развития и разложения органического вещества.

2. Биогенные элементы в различных компонентах природной среды Арктики показали минимальные концентрации во льду (ледниковом, речном, морском), средние концентрации в морской поверхностной, придонной и речной воде и максимальные концентрации в многолетней мерзлоте и морских донных отложениях.
3. Влияние ледника прослеживается начиная с поздней зимы (март) в течение всего года по показателям солености, щелочности и в особенности по высокой концентрации силикатов ( $>40 \mu\text{M}$ ), наблюдаемых в локальных максимумах и на разных глубинах, что может быть связано с высокой неоднородностью ледникового плюма. Биогеохимический режим у ледника отличается от аналогичных характеристик на выходе из фьорда. У ледника наблюдается более высокая биологическая продуктивность, связанная с поступлением биогенных веществ с талой ледниковой водой, более выраженной асидификацией (более низким индексом  $\Omega$ ) и более быстрым восстановлением содержания биогенов после летних вспышек цветения (сентябрь).
4. Азот является лимитирующим элементом для фотосинтеза, значения нитратов низки как на выходе из фьорда, так и у ледника.
5. Во фьордах растворенная кремнекислота представляется лучшим индикатором для речных и талых ледниковых вод, что связано с высокой концентрацией этого элемента в подстилающих коренных породах.
6. Экспериментально подтверждено, что при попадании многолетней мерзлоты в морскую воду основное выделение как биогенных элементов, так и загрязнителей происходит в первые часы после попадания мерзлоты в воду. Измеренные датчиками изменения растворенного кислорода и pH позволяют оценить время интенсивного выделения примерно в 4-5 часов,

после чего скорость выделения уменьшается и прекращается через 10-15 часов после начала эксперимента. Биогенные элементы, начинают использоваться прибрежной экосистемой уже через 3-4 часа или даже ранее.

7. Деградация вечной мерзлоты приводит к увеличению концентраций тяжелых металлов, что является естественным процессом, не связанным напрямую с человеческой деятельностью, но может добавляться к их антропогенному поступлению и оказывать влияние на прибрежные экосистемы.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из списка ВАК:*

1. **Pogojeva M.**, Yakushev E., Ilinskaya A., Polukhin A., Braaten H.-F. Experimental study of the influence of thawing permafrost on chemical properties of the sea water. // Russian Journal of the Earth Sciences. — 2018. — V. 18. — ES5002 — DOI :10.2205/2018ES000629.
2. **Погожева М.П.**, Полухин А.А., Якушев Е.В., Ильинская А.А., Маккавеев П.Н., Проценко Е.А., Степанова С.В., Хлебопашев П.В., Якубов Ш.Х., Стаалстрём А., Норли М. Влияние таяния материкового льда и вечной мерзлоты на химическую структуру прибрежных вод западного Шпицбергена. // Процессы в геосредах. – 2018. – № 3(17). – С. 121-125.
3. **Погожева М.П.**, Якушев Е. В., Петров И. Н., Яески Е. А. Экспериментальное исследование влияния таяния многолетней мерзлоты на содержание биогенных элементов и тяжелых металлов в морской воде при абразионном разрушении арктических берегов // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 67-75 — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-67-75.
4. **Pogojeva M.**, Polukhin A., Makkaveev P., Staalstrøm A., Berezina A., Yakushev E. Arctic Inshore Biogeochemical Regime Influenced by Coastal Runoff and Glacial Melting (Case Study for the Templefjord, Spitsbergen) // Geosciences. — 2022. — V.12, № 44 — DOI: 10.3390/geosciences12010044.

*Публикации автора в изданиях, не входящих в перечень ВАК:*

5. Аляутдинов А.Р., Ушакова Л.А., Артамонова Т.В., Коршенко А.Н., **Погожева М.П.** Информационные технологии оценки качества вод

- восточной части Финского залива // ИнтерКарто. ИнтерГИС. — 2017. — Т. 23. № 1. — С. 286-296.
6. Ozturk B., **Pogozheva M.**, Marine Litter, BSC. State of the Environment of the Black Sea (2009-2014/5) // Publications of the Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution (BSC). – 2019. – Istanbul, Turkey. – P.212-222. – ISBN 978-605-84837-0-5.
  7. Коршенко А.Н., Крутов А.Н., Матвейчук И.Г., Аляутдинов В.А., Косевич Н.И., Аляутдинов А.Р., Иванов Д.Б., **Погожева М.П.** Глава 3.3.5. Загрязнение морей Российской Федерации // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2014 г. – 2015. – Москва. – С. 151-162
  8. Коршенко А.Н., Матвейчук И.Г., **Погожева М.П.**, Косевич Н.И., Крутов А.Н., Аляутдинов А.Р., Иванов Д.Б. Глава 3.3.5. Загрязнение морских вод Российской Федерации по гидрохимическим показателям // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2015 г. – 2016. – Москва. – С. 131-140.
  9. Коршенко А.Н., Постнов А.А., Матвейчук И.Г., **Погожева М.П.**, Косевич Н.И., Крутов А.Н., Аляутдинов А.Р. Глава 3.3.5. Загрязнение морских вод Российской Федерации по гидрохимическим показателям // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2016 г. – 2017. – Москва. – С. 145-157.

Также по теме диссертации опубликованы 19 статей в изданиях, не входящих в перечень ВАК, одна монография и 25 тезисов докладов в материалах и сборниках трудов российских и международных научных конференций.