

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТАЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ НА СОДЕРЖАНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В МОРСКОЙ ВОДЕ ПРИ АБРАЗИОННОМ РАЗРУШЕНИИ АРКТИЧЕСКИХ БЕРЕГОВ

М. П. Погожева

Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

Е. В. Якушев

Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация),
Норвежский институт водных исследований (Осло, Норвегия)

И. Н. Петров

Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова (Москва, Российская Федерация)

Е. А. Яески

Северо-Западный филиал ФГБУ «НПО Тайфун» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 11 октября 2020 г.

В условиях глобального потепления таяющая мерзлота является потенциальным источником органических и неорганических форм биогенных элементов, а также тяжелых металлов. Во время работы российско-норвежской экспедиции на архипелаге Шпицберген в июне 2018 г. был проведен лабораторный эксперимент для оценки влияния таяния многолетней мерзлоты на химические свойства морской воды. Образцы многолетней мерзлоты были отобраны с абразионного склона в 10 км к западу от поселка Лонгиербиен. Эксперимент был поставлен в лаборатории Университетского центра на Свальбарде (UNIS), были исследованы изменения растворенного кислорода (рН), концентраций биогенных элементов и загрязняющих веществ, связанные с таянием многолетней мерзлоты. Пробы многолетней мерзлоты добавлялись к пробам морской воды, после чего раствор выдерживался в естественных условиях, и через определенные интервалы времени проводился отбор проб. Это позволило оценить изменения концентраций химических веществ в результате таяния многолетней мерзлоты. Эксперимент показывает значимость исследованного процесса для прибрежных вод, его влияние на поступление биогенных веществ, тяжелых металлов, подкисление океана и в связи с этим демонстрирует подверженность прибрежных экосистем множественным факторам, связанным с глобальным потеплением.

Ключевые слова: таяние многолетней мерзлоты, биогеохимический режим прибрежных вод, подкисление океана, загрязнение морских вод.

Введение

Водосбор Северного Ледовитого океана включает обширные районы с многолетней мерзлотой, расположенные на территории Сибири, Аляски и Шпицбергена. Кроме того, на арктическом шельфе есть подводная многолетняя мерзлота, занимающая значительные территории в море Лаптевых и Вос-

точно-Сибирском море. Потепление климата в последние десятилетия привело к сокращению площади и толщины многолетних арктических льдов и подвергло открытые пространства морской воды еще большему воздействию солнечного света и нагреванию [1]. Продолжающиеся увеличение температуры морской воды и сокращение площади льда приведут к таянию многолетней мерзлоты и эрозии берегов, ранее защищенных морским льдом [2]. При

таянии многолетней мерзлоты с последующим эрозийным разрушением береговой зоны большие количества метана, диоксида углерода, органического углерода, биогенных элементов и потенциальных загрязняющих веществ высвобождаются и поступают в атмосферу, реки и моря [3; 4]. Тем не менее влияние таяния многолетней мерзлоты на изменения климатических условий не очевидно, и современные модели не учитывают поступление углерода в океан и атмосферу от данного процесса. Это связано с тем, что в настоящее время существует пробел в знаниях о том, как именно тающая многолетняя мерзлота, попадающая в воду, может менять химические свойства морской воды качественно и количественно.

Мы предполагаем, что как минимум для прибрежных акваторий таяние многолетней мерзлоты может быть важным источником поступления биогенных соединений и загрязнителей, таких как тяжелые металлы. Целью данной работы была оценка количества биогенных элементов и тяжелых металлов, которые могут высвободиться при попадании в воду многолетней мерзлоты, и оценка того, как во времени изменяются изучаемые параметры. Описываемые здесь работы проведены в 2018 г. и представляют собой продолжение работ 2017 г. [5].

Совместная российско-норвежская экспедиция работала 19—28 июня 2018 г. в прибрежных водах архипелага Шпицберген в районе залива Темпельфьорд. В ней участвовали сотрудники Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, НПО «Тайфун» (Санкт-Петербург), Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва), Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова (Москва) и Норвежского института водных исследований (Осло). Работы проводились в рамках международных проектов «РОМРА» и «ICOTA», поддержанных Научно-исследовательским советом Норвегии (Research Council of Norway — RCN). Эти междисциплинарные проекты российско-норвежского научного сотрудничества в арктическом регионе ориентированы на сбор данных о современном химическом режиме прибрежных вод, состоянии карбонатной системы и биогеохимического состояния среды, подверженной таянию многолетней мерзлоты, и на сравнение методик исследований.

Методы

Для экспериментальных исследований был выбран архипелаг Шпицберген, находящийся на границе Баренцева и Гренландского морей Северного Ледовитого океана и подвергающийся, как и все арктическое побережье, процессам, связанным с глобальным изменением климата. На Шпицбергене в отличие от большинства других высокоширотных районов существует хорошая инфраструктура, позволяющая эффективно осуществлять научные исследования. Экспедиции базировались в поселке Лонгиербиен, расположенном в Ис-фьорде на западном побережье архипелага Шпицберген. Пробы

Северный Ледовитый океан



Рис 1. Район исследования
Fig 1. Study area

морской воды отбирались с пирса, пробы многолетней мерзлоты — с абразионного склона, расположенного примерно в 10 км западнее Лонгиербиена вблизи аэропорта (рис. 1).

Эксперимент проводился следующим образом. Предварительно взвешенные образцы многолетней мерзлоты (массой около 50—55 г) помещали в пластиковые широкогорлые склянки и добавляли 1 л морской воды. Склянки с приоткрытыми крышками выдерживались в течение пяти суток в пластиковых контейнерах, выставленных на улице, что имитировало естественные условия. Эксперимент был начат одновременно для всех склянок. Пробы из склянок отбирались через интервалы, указанные в табл. 1, и в итоге была получена серия образцов морской воды с различным временем контакта с мерзлотой. Параллельно были экспонированы пробы морской воды без многолетней мерзлоты и дистиллированной воды с добавлением многолетней мерзлоты, что позволило оценить фоновые изменения при оценке влияния таяния образцов мерзлоты на изменчивость химического состава воды. Всего в течение четырех суток было отобрано 19 образцов, включая параллельные пробы.

Пробы для измеряемых параметров отбирались в соответствии с принятыми методиками [6]. Пробы на содержание биогенных веществ отбирались в склянки объемом 100 мл и фиксировались серной кислотой (1 мл 4М H₂SO₄). Анализы на биогенные элементы были выполнены в Норвежском институте водных исследований (НИВА) в Осло, анализы на тяжелые металлы проводились в Государствен-

Таблица 1. График отбора проб в 2018 г.

Вид пробы	Время с начала эксперимента, ч							
	0	2	3	4	12	24	72	73
SW	■							
SW + PF		■						
SW + PF			■					
SW + PF				■				
SW + PF					■			
SW + PF						■		
SW + PF							■	
SW без PF								■
DW + PF								

Примечание. SW — морская вода, PF — многолетняя мерзлота, DW — дистиллированная вода.

ном океанографическом институте им. Н. Н. Зубова в Москве. Анализы на содержание биогенных элементов были выполнены в лаборатории НИВА в соответствии с аккредитованными норвежскими методиками [7]. Тяжелые металлы определялись методом атомной абсорбции согласно руководящим документам Росгидромета РД 52.24.377-2008 и РД 52.10.778-2013 [8].

Кроме того, в одной из склянок с добавленным образцом мерзлоты измерялась суточная изменчивость растворенного кислорода и pH. Изменения кислорода регистрировались кислородным оптодом Ocean Optics (сенсоры FOXY-R и FOXY-AF-WW) с датчиком температуры, величина pH измерялась с помощью pH-метра Metrohm 914 по методике производителя с использованием буферных растворов фирмы «Mettlet-Toledo».

Полученные результаты

На рис. 2—4 показаны изменения концентраций изучаемых параметров, нормированные к добавлению 1 г многолетней мерзлоты в 1 л морской воды, ниже обозначаемые как «мкмоль/г мерзлоты» для

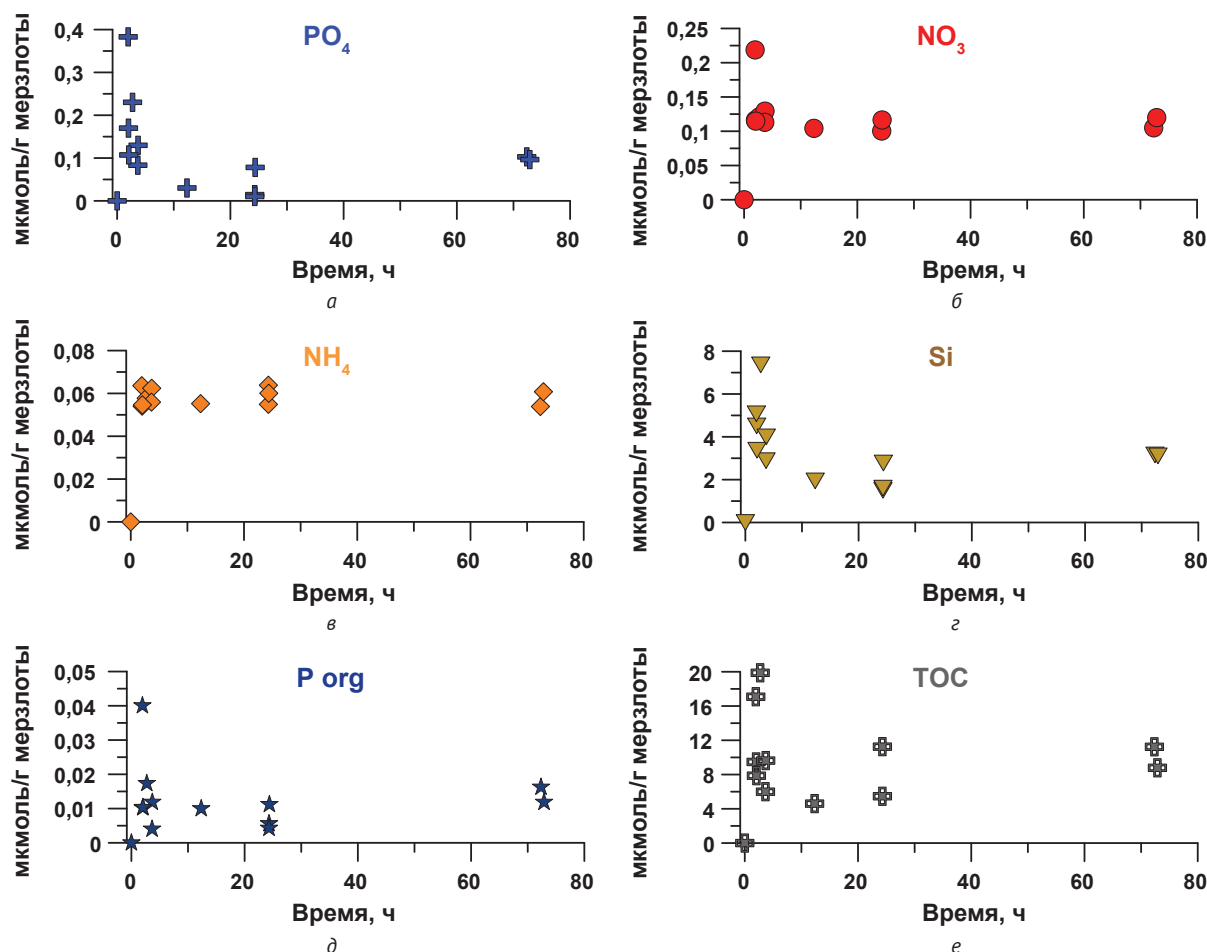


Рис. 2. Изменения концентрации фосфатов PO₄ (а), нитратов и нитритов NO₃ (б), аммония NH₄ (в), силикатов Si (г), растворенного органического фосфора P org (д), общего органического углерода TOC (е) в результате таяния 1 г многолетней мерзлоты в 1 л морской воды

Fig. 2. Changes in the concentration of phosphates, PO₄ (a), nitrates and nitrites, NO₃ (б), ammonium, NH₄ (в), silicates, Si (г), dissolved organic phosphorus, P org (д), total organic carbon, TOC (е) as a result of melting of 1 g of permafrost in 1 liter of sea water

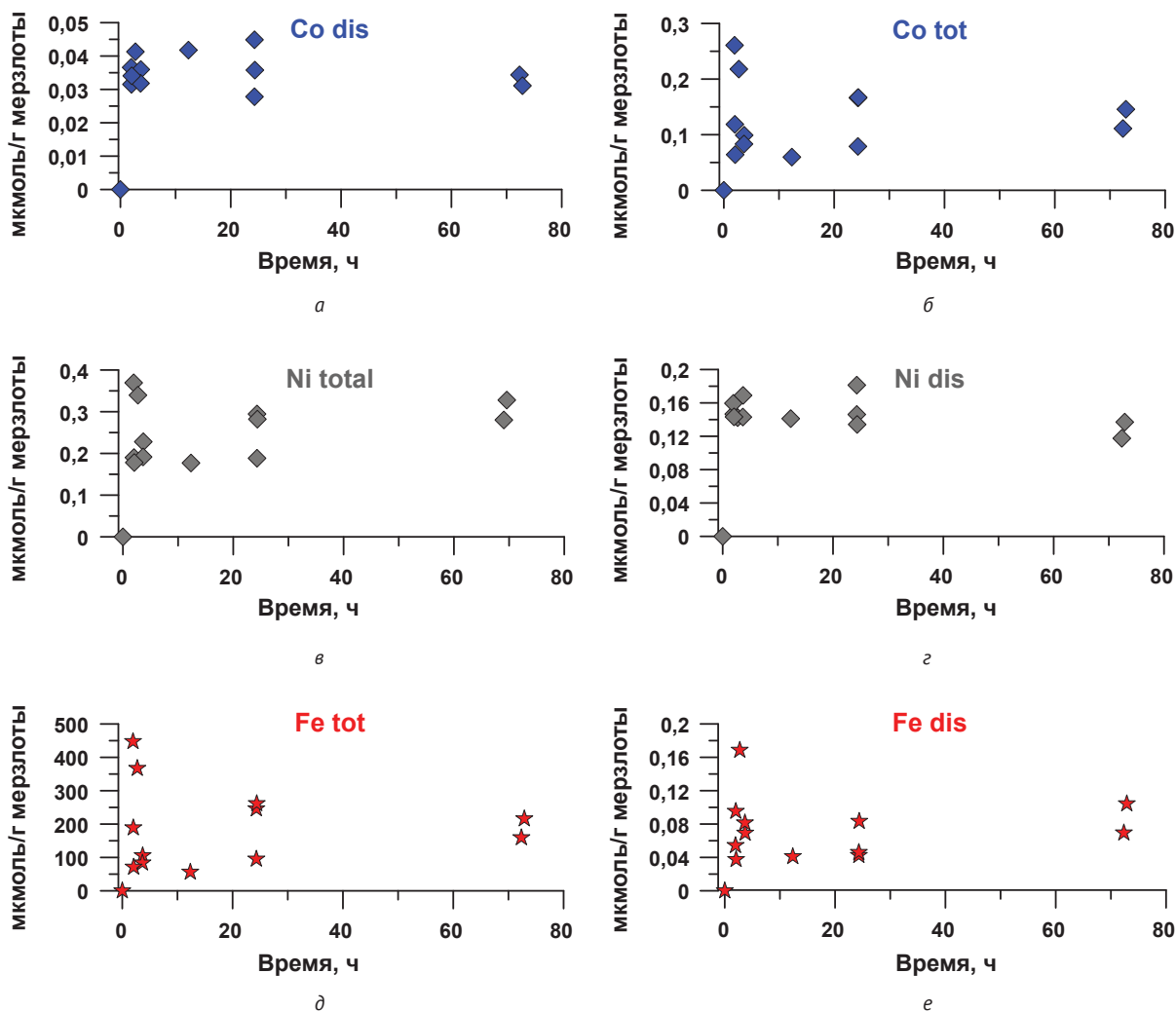


Рис. 3. Изменения концентрации тяжелых металлов – кобальта общего (а), кобальта растворенного (б), никеля общего (в), никеля растворенного (г), цинка общего (д), цинка растворенного (е) в результате таяния 1 г многолетней мерзлоты в 1 л морской воды во время эксперимента 2018 г.

Fig. 3. Changes in the concentration of heavy metals – total cobalt (a), dissolved cobalt (b), total nickel (c), dissolved nickel (d), total zinc (e), dissolved zinc (f) as a result of thawing of 1 g of permafrost in 1 liter of seawater during the 2018 experiment

биогенных элементов и «мкг/г мерзлоты» для тяжелых металлов в пробах многолетней мерзлоты, выраженные в граммах на грамм сухого веса высушенного осадка.

Концентрации неорганических форм биогеогенных элементов резко увеличиваются через 2 ч после контакта с мерзлотой, содержание фосфатов возрастает на 0,4 мкмоль/г мерзлоты, содержание нитратов — на 0,22 мкмоль/г мерзлоты, силикатов — на 7 мкмоль/г мерзлоты. Однако через 12 ч их концентрации снижаются, достигая соответственно 0,1 мкмоль/г мерзлоты для фосфатов, 0,1 мкмоль/г мерзлоты для нитратов и 3 мкмоль/г мерзлоты для силикатов, и сохраняются на том же уровне до конца эксперимента (73 ч). Аналогичные тенденции могут быть отмечены в изменениях органического фосфора и общего органического углерода: концентрации сначала возрастали соответственно до 0,04 мкмоль/г мерзлоты и 20 мкмоль/г мерзлоты и снижались до

Таблица 2. Содержание тяжелых металлов в пробе многолетней мерзлоты

Тяжелый металл	Содержание, мг/г	Тяжелый металл	Содержание, мг/г
Ni	37	Cr	41
As	14,5	Cu	7,6
Cd	0,03	Pb	1,7
Zn	17	Fe	26,8
Mn	138	Al	12,9

0,02 мкмоль/г мерзлоты и 12 мкмоль/г мерзлоты. Содержание аммония возрастало на 0,06 мкмоль/г мерзлоты и оставалось постоянным во время проведения эксперимента.

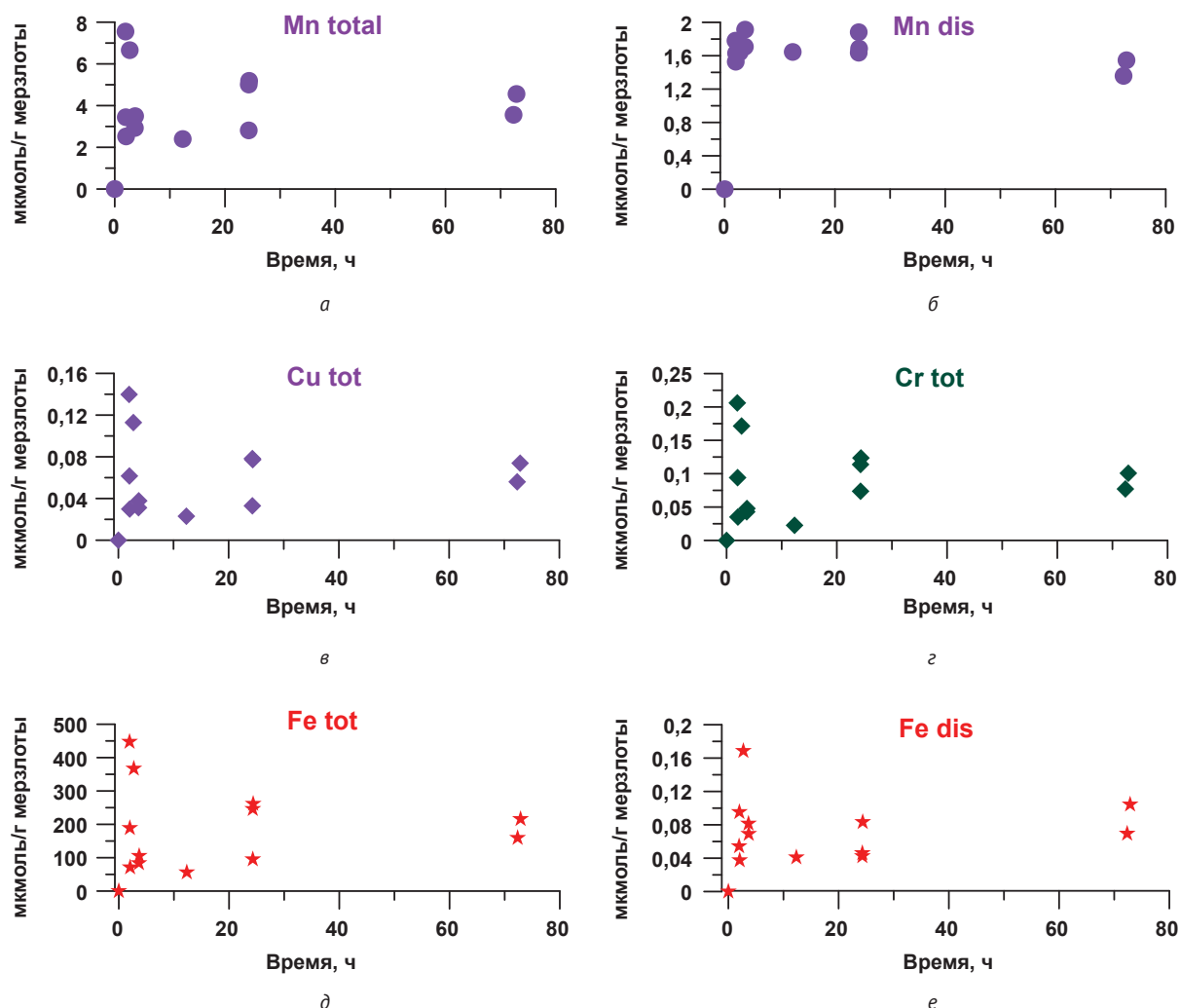


Рис. 4. Изменения концентрации тяжелых металлов – общего марганца (а), растворенного марганца (б), общей меди (в), общего хрома (г), общего железа (д), растворенного железа (е) в результате таяния 1 г многолетней мерзлоты в 1 л морской воды во время эксперимента 2018 г.

Fig. 4. Changes in the concentration of heavy metals – total manganese (a), dissolved manganese (b), total copper (c), total chrome (g), total iron (d), dissolved iron (e) as a result of melting of 1 g of permafrost in 1 liter of seawater during the 2018 experiment

Уменьшение содержания неорганических форм биогенных элементов после пика увеличения может быть связано с их потреблением на фотосинтез, а органические формы фосфора и углерода, поступившие из мерзлоты, могут минерализоваться бактериями. Содержание аммонийного азота трудно интерпретировать, так как эксперимент проводился с приоткрытыми крышками склянок, возможно, аммоний достиг равновесия с его содержанием в воздухе и не изменялся во время наблюдений.

Концентрация общего и растворенного кобальта резко увеличивается через 2 ч после контакта с мерзлотой, достигая 0,26 мкг/г мерзлоты и 0,04 мкг/г мерзлоты соответственно. Через 12 ч содержание общей формы падает до 0,05 мкг/г мерзлоты, а содержание растворенной формы остается практически без изменений на протяжении всего эксперимента. Концентрация общего и рас-

творенного никеля также существенно повышается до 0,38 и 0,18 мкг/г мерзлоты соответственно, после чего постепенно уменьшается в течение всего времени. Подобным образом меняется и содержание цинка лишь с большим падением концентраций в 12-часовой пробе.

Скорость выделения остальных тяжелых металлов соответствует общей схеме резкого повышения в первые 2 ч, затем сильного уменьшения после 12 ч и относительной стабилизации во время остального периода экспозиции в течение 5 сут. Лишь концентрация общего марганца отличается от общей картины, демонстрируя практически постоянный высокий уровень после двухчасового повышения. Скорость выделения железа увеличивается значительно сильнее, чем других тяжелых металлов, в первые 2 ч концентрация достигает значений 450 мкг/г мерзлоты. Через 12 ч концентрация па-

дает до 50 мкг/г мерзлоты, затем повышается до 260 мкг/г мерзлоты и постепенно стабилизируется на значениях около 200 мкг/г мерзлоты к концу эксперимента. Скорость выделения растворенного железа изменялась в течение эксперимента в пределах 0,02—0,18 мкг/г мерзлоты.

Кроме отбора проб на химические анализы в одной из склянок фиксировались изменения температуры, pH и растворенного кислорода датчиками в течение первых 24 ч эксперимента. Как видно из рис. 5, содержание кислорода в первые 4 ч после контакта воды с мерзлотой резко уменьшается с примерно 410 мкмоль до 390 мкмоль (около 5 мкмоль в час), затем скорость падения кислорода уменьшается до около 2 мкмоль в час, и концентрации стабилизируются через примерно 12 ч после начала эксперимента на уровне 375—380 мкмоль. Аналогичная изменчивость характерна и для pH, чьи величины убывают с 7,55—7,60 до 7,40—7,45 за первые 4 ч и через 12 ч с начала эксперимента стабилизируются на уровне 7,35—7,40. Температура воды в течение эксперимента, начатого в 8:00, изменялась от +8°C до +15°C. Минимальное значение отмечено в начале эксперимента, а максимум зафиксирован через 5 ч после его начала. Значительного влияния изменения температуры на исследуемые процессы не прослеживается.

Обсуждение

Влияние таяния многолетней мерзлоты на арктические экосистемы в настоящее время недостаточно изучено, из-за чего связанные с этим влиянием процессы обычно не учитываются в глобальных климатических моделях. Новые натурные эксперименты, посвященные влиянию таяния многолетней мерзлоты на биогеохимический режим и содержание загрязнителей, очень востребованы, в том числе для корректировки анализируемых в моделях процессов. Предложенная нами методика таких исследований [5] довольно проста в реализации и может быть применена в других регионах Арктики.

Данные исследования были проведены с целью экспериментальной оценки изменения химического состава прибрежных вод при попадании в морскую воду материала, сохранявшегося в состоянии многолетней мерзлоты тысячелетия и ставшего доступным из-за происходящих в настоящее время климатических изменений. Выбранный район исследований — архипелаг Шпицберген считается репре-

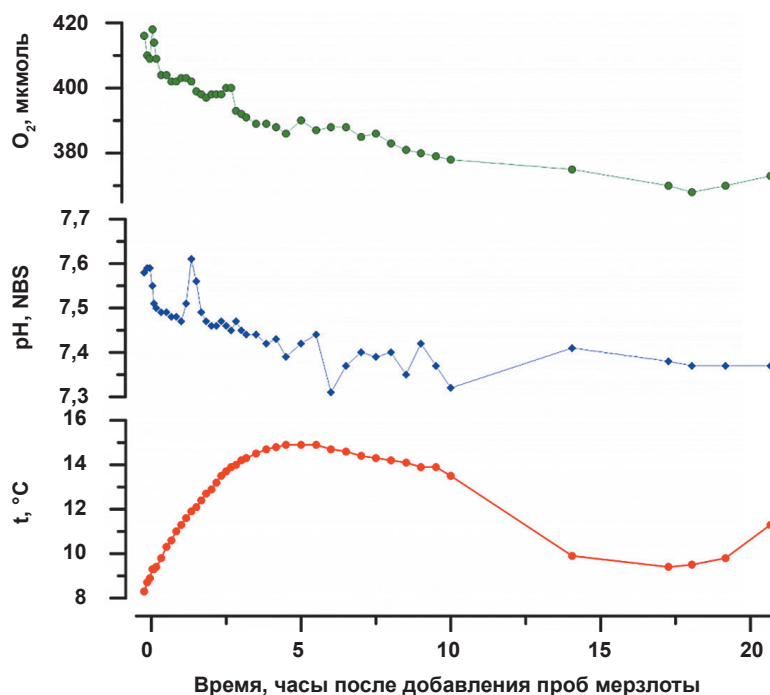


Рис. 5. Изменения температуры, pH и растворенного кислорода, измеренные датчиками во время эксперимента

Fig. 5. Changes in temperature, pH and dissolved oxygen measured by the sensors during the experiment

зентативным полигоном, на котором можно изучать процессы, происходящие на арктическом побережье и в других регионах.

Исследования были проведены в июне, в период интенсивного берегового стока, поэтому характеристики прибрежных вод изначально сильно отличались от типичных для морских вод величин. Так, уровень pH в начале эксперимента в районе 7,5—7,6 очень низок для открытых вод океана, в то же время величины концентраций неорганических форм биогенных элементов были не очень большими, что может быть связано с их потреблением на фотосинтез в водотоках на суше и на поверхности прибрежных вод в районе отбора. Видимо, наличие лимитированного биогенными элементами фитопланктона может объяснить отмеченное нами интенсивное потребление неорганических форм биогенных элементов.

Данные о содержании тяжелых металлов в многолетней мерзлоте очень ограничены, но можно сравнить результаты предыдущих экспериментов относительно биогенных веществ. Уровень деградации донных отложений в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском был исследован [9], и обнаружилось, что уровень анаэробного разложения меняется в 6 раз от 2,4 (мкмоль CO₂)/(г ОС сут) в море Лаптевых (ОС — органический углерод), до 15 (мкмоль CO₂)/(г ОС сут) в Восточно-Сибирском море, а аэробное разложение в Восточно-Сибирском море составляет 30 (мкмоль CO₂)/(г ОС сут). Уровень аэробной деградации с коррекцией на органический углерод (10 мг ОС г СВ⁻¹) составляет 0,3

(мкмоль CO_2)/(г ОС сут) или 0,15 (мкмоль CO_2)/(г СВ сут) для сырого веса (СВ) и пористости, равной 50%.

На основании данного эксперимента можно оценить скорость поступления углерода из 1 г многолетней мерзлоты за сутки, основываясь в первом приближении на соотношении Редфилда C:N:P = 106:16:1. Например, изменения для фосфатов за сутки в 0,04 мкмоль/г мерзлоты даст около 4,2 мкмоль C/г мерзлоты, а 0,1 мкмоль/г мерзлоты в сутки для нитратов даст 0,7 мкмоль C/г мерзлоты в сутки. Эти значения, около 0,7—4,2 мкмоль C/г мерзлоты, близки по порядку величин к приведенным выше оценкам в 0,15 (мкмоль CO_2)/(г ОС сут) [9].

В целом в результате постановки эксперимента в 2018 г. получены данные об изменении химических параметров морской воды и поведении возможных загрязнителей в результате контакта с многолетней мерзлотой в течение первых четырех суток. На наш взгляд, наиболее интересным результатом работы является экспериментальное подтверждение того, что 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 ч, после чего его скорость уменьшается, и оно прекращается через 10—15 ч после начала эксперимента. Биогенные элементы начинают использоваться прибрежной экосистемой уже через 3—4 ч или даже ранее. При этом уменьшается содержание как органических, так и неорганических форм.

Появление взвешенного железа в воде речного и берегового стока описано в [10], где отмечается, что доминирование взвешенной формы связано с гуминовым веществом, в результате чего образуются частицы нейтральной плавучести, содержащие железо. При этом происходит уменьшение содержания как органических, так и неорганических форм. Динамика тяжелых металлов определяется (и скоррелирована) с динамикой общего железа. Можно предположить, что в первые часы после попадания мерзлоты в воду происходит окисление восстановленных форм железа и образуются их оксиды, которые влияют на динамику исследованных элементов, что, однако, требует дополнительных работ для подтверждения. Безусловно, высвобождение из мерзлоты тяжелых металлов — естественный процесс, а не антропогенное загрязнение, и он не связан напрямую с человеческой деятельностью. Однако следует отметить, что таяние мерзлоты приводит к увеличению общих фоновых концентраций тяжелых металлов, что может добавляться к их антропогенному поступлению и оказывать влияние на прибрежные системы.

В целом результаты эксперимента демонстрируют необходимость учета процесса разрушения абразионных берегов в зоне многолетней мерзлоты как для загрязнения тяжелыми металлами, так

и для биогеохимических круговоротов в прибрежной зоне, 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 многолетней мерзлоты.

Безусловно, данные исследования должны быть продолжены в аналогичных микро- и мезокозм-экспериментах, желательнее с большим объемом проб, и в других регионах с различающимся составом абразионного материала, содержащего мерзлоту.

Выводы

Приведено описание организации и проведения лабораторного эксперимента для исследования влияния образцов многолетней мерзлоты из абразионного материала на биогеохимические показатели и содержание тяжелых металлов в пробах прибрежных вод.

На примере выполненных работ на Шпицбергене установлены величины изменений концентраций биогенных элементов и металлов, нормированные на 1 г абразионного материала на 1 л воды.

На основании измерений датчиками и отбором проб подтверждено, что основное выделение биогенных элементов и загрязнителей происходит в первые часы после попадания в воду многолетней мерзлоты. Изменения растворенного кислорода и pH позволяют оценить время интенсивного выделения примерно в 4—5 ч, после чего выделение уменьшается и прекращается через 10—15 ч после начала эксперимента. Мы предполагаем, что биогенные элементы начинают использоваться прибрежной экосистемой уже через 3—4 ч, что приводит к уменьшению содержания их органических и неорганических форм.

Эксперимент показывает увеличение общих фоновых концентраций тяжелых металлов в процессе таяния мерзлоты, что является естественным процессом, не связанным напрямую с человеческой деятельностью, но может добавляться к их антропогенному поступлению и оказывать влияние на прибрежные экосистемы.

Работа была выполнена при поддержке проектов: Norwegian Research Council project 246752 «ПОМПА: Загрязнители и параметры карбонатной системы в природных средах полярных областей: снег — лед — морская вода — осадки — береговой сток» (POMPA- Pollutants and carbonate system parameters in polar environment media: snow-ice-seawater-sediments-coastal discharges), 283482 «ИКЮТА: Влияние таяния вечной мерзлоты на био-

геохимические свойства и загрязнение морской среды» (ICOTA — Influence of coastal permafrost thawing on biogeochemistry and pollutants of the sea water), Svalbards miljøvernfond project «Влияние таяния вечной мерзлоты на подкисление и биопродуктивность» («Permafrost decay for acidification/bioproductivity»), Norwegian Ministry of Climate and Environment project PERMACID, проекта НИОКР Росгидромет, тема 1.5.3.7 «Исследования современного состояния и анализ предшествовавших изменений характеристик природной среды архипелага Шпицберген» и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема 0149-2019-0003).

Литература/References

1. IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Vol. IPCC. Geneva, Switzerland, 2014, 151 p. DOI: 10.1017/CBO9781139177245.003.
2. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2017, xiv + 269 p.
3. Semiletov I. P., Shakhova N. E., Pipko I. I., Pugach S. P., Charkin A. N., Dudarev O. V., Kosmach D. A., Nishino S. Space-time dynamics of carbon and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay and adjacent part of the Laptev Sea. Biogeosciences, 2013, vol. 10, no. 9, pp. 5977—5996. DOI: 10.5194/bg-10-5977-2013.
4. Vonk J. E., van Dongen B. E., Alling V., Kosmach D., Charkin A., Semiletov I. P., Dudarev O. V., Sa L., Shakhova N., Roos P., Eglinton T. I., Andersson A. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia. Nature, 2012, no. 489, pp. 137—140. DOI: 10.1038/nature11392.
5. Pogojeva M., Yakushev E., Ilinskaya A., Polukhin A., Braaten H., Kristiansen T. Experimental study of the influence of thawing permafrost on the chemical properties of sea water. Russian J. of Earth Sciences, 2018, vol. 18, Sept., pp. 2—7. DOI: 10.2205/2018ES000629.
6. Grashoff K., Kremling K. E. M. Methods of seawater analysis, 3rd completely revised and extended edition. [S. l.], WILEY-VCH Verl. GmbH, 1999, 632 p.
7. Kaste Ø., Skarbøvik E., Greipsland I., Gundersen C. B., Austnes K., Skancke L. B. et al. The Norwegian River Monitoring Programme — Water Quality Status and Trends 2017. NIVA-Repport 1168. Norway, 2018.
8. Руководство по химическому анализу морских вод — РД 52.10.243-92. — СПб.: Гидрометеоздат, 1993. — 129 с.
9. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh vod. РД 52.10.243-92. [Guidelines for the chemical analysis of marine waters. РД 52.10.243-92]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1993, 129 p. (In Russian).
10. Karlsson E. S., Brüchert V., Tesi T., Charkin A., Dudarev O., Semiletov I., Gustafsson Ö. Contrasting regimes for organic matter degradation in the East Siberian Sea and the Laptev Sea assessed through microbial incubations and molecular markers. Marine Chemistry [Elsevier B.V.], 2015, vol. 170, pp. 11—22. DOI: 10.1016/j.marchem.2014.12.005.
11. Conrad S., Ingri J., Gelting J., Nordblad F., Engström E., Rodushkin I., Andersson P. S., Porcelli D., Gustafsson Ö., Semiletov I., Öhlander B. Distribution of Fe isotopes in particles and colloids in the salinity gradient along the Lena River plume, Laptev Sea. Biogeosciences, 2019, vol. 16, no. 6, pp. 1305—1319. DOI: 10.5194/bg-16-1305-2019.

Информация об авторах

Погожева Мария Петровна, старший научный сотрудник, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), аспирант, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: pogojeva_maria@mail.ru.

Якушев Евгений Владимирович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), старший научный сотрудник, Норвежский институт водных исследований (NIVA) (0345, Норвегия, Осло, Гаустадаллен 21), e-mail: evgeniy.yakushev@niva.no.

Петров Илья Николаевич, инженер, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), e-mail: ipetrov@mail.ru.

Яески Евгений Александрович, заместитель начальника аналитической лаборатории Северо-Западного филиала ФГБУ «НПО Тайфун» (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), e-mail: typhoon.ecol@mail.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Погожева М. П., Якушев Е. В., Петров И. Н., Яески Е. А. Экспериментальное исследование влияния 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.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PERMAFROST THAWING EFFECT ON THE CONTENT OF NUTRIENTS AND HEAVY METALS IN SEAWATER DURING ABRASION DESTRUCTION OF THE ARCTIC COAST

Pogojeva M. P.

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Yakushev E. V.

P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation), Norwegian Institute for Water Research (Oslo, Norway)

Petrov I. N.

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute (Moscow, Russian Federation)

Yaeski E. A.

North-West brunch of FSBI "NPO Typhoon" (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on October 11, 2020

Abstract

In the context of global warming, the permafrost thawing could have a significant impact on the chemical composition of seawaters in the Arctic. Permafrost thawing is a potential source of organic and inorganic forms of nutrients, as well as heavy metals. During the Russian-Norwegian expedition to Svalbard in June 2018, the researchers carried out a laboratory experiment to assess the permafrost thawing effect on the chemical properties of seawater. They took permafrost samples from an abrasive slope 10 km west of Longyearbyen. The experiment took place in the laboratory of the University Center on Svalbard (UNIS), the changes in dissolved oxygen, pH, concentrations of nutrients and pollutants associated with the thawing of permafrost were investigated. During the experiment, the researchers added permafrost samples to the seawater samples, and then kept the solution under natural conditions while taking samples at regular intervals. The experimental data made it possible to assess the changes in the concentration of chemicals because of the permafrost thawing. The experiment shows the significance of the investigated process for coastal waters, its effect on the supply of nutrients, heavy metals, ocean acidification, and, in this regard, demonstrates the sensibility of coastal ecosystems to multiple factors associated with global warming.

Keywords: *permafrost thawing, biogeochemical regime of coastal waters, ocean acidification, pollution of seawaters.*

The work was supported by the projects: Norwegian Research Council project 246752 POMPA — Pollutants and carbonate system parameters in polar environment media: snow-ice-seawater-sediments-coastal discharges, 283482 ICOTA: Influence of coastal permafrost thawing on biogeochemistry and pollutants of the sea project, Svalbards miljøvernforvaltning "Influence of permafrost thawing on acidification and bioproductivity" ("Permafrost decay for acidification / bioproductivity"), Norwegian Ministry of Climate and Environment project PERMACID, Roshydromet R&D project, topic 1.5.3.7 "Research of the current state and analysis of previous changes in the characteristics of the natural environment of the Spitsbergen archipelago" and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic 0149-2019-0003).

Information about the authors

Pogojeva Maria Petrovna, Senior Researcher, N. N. Zubov's State Oceanographic Institute (6, Kropotkinskii Lane, Moscow, Russia, 119034), Postgraduate, P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS (36, Nahimovskii prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: pogojeva_maria@mail.ru.

Yakushev Evgeniy Vladimirovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS (36, Nahimovskii prosp., Moscow, Russia, 117997), Senior Researcher, Norwegian Institute for Water Research (Gaustadalleen 21, Oslo, 0345, Norway), e-mail: evgeniy.yakushev@niva.no.

Petrov Ilya Nikolaevich, Engineer Researcher, N. N. Zubov's State Oceanographic Institute (6, Kropotkinskii Lane, Moscow, Russia, 119034), e-mail: ipetrov@mail.ru.

Yaeski Evgeniy Alexandrovich, Deputy Chief of Analytical Laboratory, North-West brunch of FSBI "NPO Typhoon" (38, Beringa str., St. Petersburg, Russia, 199397), e-mail: typhoon.ecol@mail.ru.

Bibliographic description

Pogojeva M. P., Yakushev E. V., Petrov I. N., Yaeski E. A. Experimental study of the permafrost thawing effect on the content of nutrients and heavy metals in seawater during abrasion destruction of the Arctic coast. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 67—75. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-67-75. (In Russian).

© Pogojeva M. P., Yakushev E. V., Petrov I. N., Yaeski E. A., 2021