

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

«Деградация мерзлоты и дисбаланс цикла углерода в системе суша-шельф-атмосфера как индикаторы климатических и экологических изменений в Арктике»

№	Фамилии, имена и отчества авторов, ученые степени и звания, должности по основному месту работы, причем руководитель работы указывается первым с соответствующей отметкой
1	Семилетов Игорь Петрович , руководитель работы, член-корреспондент РАН, доктор географических наук, заведующий лабораторией арктических исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.
2	Мазуров Алексей Карпович , доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».
3	Шахова Наталья Евгеньевна , доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник отделения геологии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».
4	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.
5	Пипко Ирина Ивановна , кандидат географических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.
6	Пугач Светлана Петровна , кандидат географических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.
7	Гончаров Иван Васильевич , доктор геолого-минералогических наук, профессор, начальник управления лабораторных исследований пластовых флюидов, технологических жидкостей и реагентов Томского научно-исследовательского и проектного института нефти и газа.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

«Деграляция мерзлоты и дисбаланс цикла углерода в системе суша-шельф-атмосфера как индикаторы климатических и экологических изменений в Арктике»

Семилетов Игорь Петрович, руководитель работы, член-корреспондент РАН, доктор географических наук, заведующий лабораторией арктических исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Мазуров Алексей Карпович, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Шахова Наталья Евгеньевна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник отделения геологии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

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.

Пипко Ирина Ивановна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Пугач Светлана Петровна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Гончаров Иван Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор начальник управления лабораторных исследований пластовых флюидов, технологических жидкостей и реагентов Открытого акционерного общества «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа».



Краткое изложение работы. На рубеже 20 и 21 веков в системе суша-шельф-атмосфера в арктических морях России впервые выявлены и исследованы процессы мобилизации и трансформации гигантского количества древнего органического вещества (ОВ), прежде сохраненного в наземной и подводной мерзлоте. Это уже привело к ряду серьёзных экологических последствий, включая нарушение баланса цикла углерода, что проявляется в массивной эмиссии основных парниковых газов метана (CH_4) и двуокиси углерода (CO_2) в атмосферу, экстремальной асидификации (подкисления) вод арктических морей России и усилило процессы перехода экосистем шельфовых морей Восточной Арктики (МВА) от автотрофного к гетеротрофному типу. Полученные авторами проекта новые знания изменяют сложившиеся современные парадигмы в области комплексного исследования экологического состояния МВА с самым широким и мелководным шельфом в Мировом океане. Они позволяют сформировать новую концепцию экологического состояния (включая геориски) шельфовых МВА в ответ на современные вызовы, обусловленные политической и народнохозяйственной необходимостью освоения Арктики. Исследования научной группы проводились при поддержке грантов Правительства РФ (№ 14.Z50.31.0012, рук. И.П. Семилетов), РФФИ (№ 15-17-20032, рук. Н.Е. Шахова), грантов РФФИ и государственного финансирования научных госзаданий.

Основная научно-техническая идея. Характерные особенности транспорта и трансформации ОВ в арктической системе суша-шельф-атмосфера определяют изменения в биогеохимическом и седиментационном режимах экологического функционирования арктических морей в условиях прогрессирующей деградации наземной и подводной мерзлоты. Наиболее существенные изменения происходят в системе суша-шельф-атмосфера МВА. Эти моря занимают около 25% всего арктического шельфа, здесь сосредоточены почти 90% всей подводной мерзлоты Северного Ледовитого океана и гигантские запасы углеводородных ресурсов. На основе всепогодных многолетних комплексных наблюдений доказано, что основной дисбаланс в современном цикле углерода обусловлен ранее неизвестным вкладом газообразных компонентов - основных парниковых газов,

CH₄ и CO₂. Показано, что основным морским источником CO₂ в атмосферу является окисление эрозионного ОВ в результате деградации ледового комплекса 6000 км арктического побережья. Доказано, что основной поставщик природного CH₄ в атмосферу Северного полушария - донные отложения МВА, интенсивность выбросов которого изменяется на пять порядков от 10⁻³ г м⁻² день⁻¹ до 10² г м⁻² день⁻¹ в зависимости от состояния подводной мерзлоты. Нами документированы неожиданно высокие скорости деградации подводной мерзлоты, что в некоторых районах МВА уже привело к заглублению ее кровли до горизонтов стабильности газовых гидратов (Shakhova et al., Nature Geoscience, 2017). Этот результат заставляет принципиально пересмотреть постулат IPCC (IPCC, 2014) о том, что подводная мерзлота МВА стабильна и к концу 21 века может протаять максимум на несколько метров. Авторами данной работы доказано, что массивированные выбросы пузырькового CH₄ способны привести к труднопредсказуемым климатическим и геоинженерным рискам. Полученные на молекулярном и изотопном уровне уникальные данные о миграционных способностях эрозионного и речного ОВ, позволяют выявлять нарушения в природных обменных процессах углерода в различных формах и экологических аспектах состояния МВА в период, предшествующий интенсивному освоению и использованию арктического шельфа. Появляется возможность эффективно обнаруживать изменения в экологическом состоянии вод при ожидаемом росте антропогенного прессинга, что крайне необходимо для правильного планирования и ведения хозяйственной деятельности в гармонии со здоровым функционированием морской экосистемы Арктики.

Значение для практики. Последствия геоэкологических катастроф, которые могут произойти при разведочно-промышленной деятельности, выполненной без учета последних достижений научных исследований авторского коллектива (неконтролируемый выброс гидратного газа и т.д.), в материальном отношении могут нанести ущерб, достигающий десятков миллиардов долларов. К примеру, рассчитанный английскими учеными с помощью экономической модели ущерб для мировой экономики от катастрофического выброса в атмосферу примерно 10% предполагаемых запасов гидратов МВА, оценивается в 60 триллионов

долларов США (при валовом мировом продукте в 2012 г. около 75 триллионов долларов) (опубликовано в *Nature*, 2012). Разработаны технологии оценки количественного выброса пузырькового метана из донных отложений путем абсолютной калибровки однолучевых и многолучевых сонаров.

Объемы внедрения. Как показано выше, объемы недополученной выгоды для мировой экономики и России могут составить многие сотни и десятки миллиардов долларов при развитии того или иного сценария деградации подводной мерзлоты МВА и дестабилизации гидратов. О важности этого направления исследований для мирового сообщества говорит редакторское вступление Президента ЕС Ван Ромпея на климатической встрече глав государств формата G7 в 2014 г.: *“This year’s Foreword by Dr. Natalia Shakhova is compelling and should be read with great trepidation and foresight”* / The G7 Summit, Brussel, Belgium, 4-5 June, 2014. Две страницы *Вводного Слова*, написанного д-ром Н. Шаховой (ключевого участника коллектива), предшествуют выступлениям лидеров стран G7 о перспективах изучения климата, что еще раз говорит о самом высоком уровне интереса к данному исследованию (полный текст этого документа доступен на сайте <http://cloud.digipage.net/go/g7climatechange2014/>).

Технологии оценки количественного выброса пузырькового метана из донных отложений путем абсолютной калибровки однолучевых и многолучевых сонаров могут быть реализованы на любом судовом эхолоте согласно опубликованному авторами подробному описанию. При необходимости, эти технологии могут быть использованы для обнаружения и количественной оценки утечек газа из морских газопроводов.

Патенты, публикации, масс-медиа. Оригинальность авторских научных знаний и технологий подтверждается: публикациями более 160 статей в журналах, цитируемых в системе Web of Science, включая ведущие мировые издания *Science*, *Nature*, *Nature Geoscience*, *Nature Communications*, объектами интеллектуальной собственности (патенты на изобретения, полезные модели, авторские свидетельства), сообщениями в десятках пленарных докладов на крупнейших международных конференциях, многочисленными публикациями в таких масс-медиа, как *Nature Geographic*, *Nature News*, *Science News*, *Expert*,

Eureka, New York Times, Spiegel, Independent, San Francisco Chronicle, на сайтах Российского Научного Фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации, Российского Фонда фундаментальных исследований, в Российской Газете и газете Поиск. В 2016 и 2017 гг. авторский коллектив опубликовал две монографии. Добавим, что одним из факторов, способных изменить климат нашей планеты в ближайшее время в масштабе жизни одного поколения, является потенциальная дестабилизация арктических морских гидратов метана.

Примеры научных разработок и технологий. (1). Последние 30 лет скорости вертикальной деградации подводной мерзлоты удвоились по сравнению с предыдущими столетиями и достигли 18 см/год, что на порядок выше ранее принятых оценок. (2). Оценка выброса метана с акватории МВА примерно в два раза выше величины, предложенной IPCC (2007) для всего Мирового океана. В воздухе над районами массивированной разгрузки пузырькового метана зарегистрировано аномально высокое содержание атмосферного метана, а в поверхностных донных осадках - следы просачивания нефтяных углеводородов. (3). Доказано, что мелкозалегающий акустический рефлектор, широко распространенный в донных осадках арктических морей, объясняется существованием газового (метанового) фронта (ГФ), а не является кровлей подводной мерзлоты, как было принято считать ранее. Причем ГФ движется вверх со скоростью до пяти и более метров в год, что приводит к массивированному выбросу пузырькового метана в воду при достижении ГФ поверхности дна. (4). Выявлен ранее неизвестный механизм подкисления (асидификации) вод МВА вследствие окисления эрозионного ОВ, а не за счет поглощения атмосферной избыточной двуокиси углерода, как во всем Мировом океане. Эффект, проявляющийся в сдвиге кислотности (подкислении) вод МВА в областях береговой эрозии примерно в 5 раз сильнее, чем в эстуарии реки Лена (531% vs 100.5%). Экстремальная асидификация вод МВА приводит к угнетению бентосных организмов (макробентос — основной корм для моржей, которые составляют значительную часть диеты белых медведей) и уже зашкаливает модельные предсказания, сделанные АМАР (2013 г.) на конец 21-го века.