ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Исследование взаимодействия заливочной жидкости и озерной воды при вскрытии подледникового озера Восток в Антарктиде

Д.В.Сербин✉, Г.В.Буслаев, А.Ю.Лаврик, В.Г.Кадочников, А.Н.Дмитриев

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Сербин Д.В., Буслаев Г.В., Лаврик А.Ю., Кадочников В.Г., Дмитриев А.Н. Исследование взаимодействия заливочной жидкости и озерной воды при вскрытии подледникового озера Восток в Антарктиде // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16610. С. 136-146. EDN NLWJEQ

Аннотация

Приведены результаты лабораторных исследований процессов образования и разрушения эмульсий воды и кремнийорганической жидкости, а также образования и диссоциации гидратов азота в термобарических условиях, приближенных к условиям на контакте ледника и подледникового озера Восток с использованием комплекса Gas Hydrate Autoclaves GHA 350. В качестве исследуемой была выбрана кремнийорганическая жидкость – полидиметилсилоксан WACKER AK-10 (в российской классификации по ГОСТ 13032-77 – ПМС-10) плотностью 0,9359 г/см^3, кинетической вязкостью 10 мм^2/с. Установлено, что понижение температуры эмульсии приводит к увеличению времени ее разрушения, образованию микроэмульсий и множественных эмульсий типа «масло – в воде – в масле», особенно это проявляется при температурах ≤10 °С. Среднее время разрушения эмульсии составило 107 с. Минимальное время разрушения эмульсии наблюдается при минимальной частоте вращения мешалки 100 об/мин и максимальной температуре 60 °С, а максимальное время разрушения эмульсии наблюдается при частоте вращения мешалки 500 об/мин и температуре –2,8 °С. Установлено, что гидраты азота образуются при давлении 35,0±0,5 МПа и температуре ≤ –1 °С.

Ключевые слова

эмульсии; кремнийорганические жидкости; газовые гидраты; бурение скважин во льду; экологически чистые технологии бурения; вскрытие подледникового озера Восток

Финансирование

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № FSRW-2024-0003.

Поступила: 10.11.2024 ***Принята: 10.04.2025*** ***Онлайн: 07.07.2025*** ***Опубликована: 07.07.2025***

Введение

В 1996 г. вышла первая официальная публикация об открытии огромного озера под мощным ледником Антарктиды в районе станции Восток, автором которой стал российский ученый А.П.Капица [1]. Из-за этого вектор научных исследований сместился в сторону комплексного междисциплинарного и международного исследования подледниковых озер [2, 3]. На сегодняшний день в Антарктиде обнаружено 675 подледниковых озер [4], а реализованных проектов бурения льда с последующим проникновением в озера всего четыре – Восток [5, 6], Уиланс [7, 8], Мерсер [8, 9] и Фильхнер [10]. Наибольший интерес российского научного сообщества вызывает крупнейшее из открытых – озеро Восток [2, 11, 12]. С 1990 г. проводилось бурение глубокой скважины 5Г специалистами Горного университета и Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) при материально-технической и научной поддержке французских специалистов и логистической поддержке американских специалистов.

Целью бурения глубокой скважины сначала являлся отбор керна по всей мощности ледника, однако с открытием подледникового озера добавилась еще одна цель – экологически безопасное вскрытие озера с последующим чистым отбором проб озерной воды [13, 14]. В результате продолжительного бурения 5 февраля 2012 г. на глубине 3769,3 м российские ученые достигли поверхности подледникового озера Восток, а 25 января 2015 г. вскрыли его повторно [5, 6, 13]. Однако отобрать чистые пробы озерной воды так и не удалось. В настоящее время специалисты Горного

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 136-146
© Д.В.Сербин, Г.В.Буслаев, А.Ю.Лаврик, В.Г.Кадочников, А.Н.Дмитриев, 2025

университета активно ведут разработки эффективных и экологически чистых технологий бурения ледникового покрова и исследований подледниковых сред [15-19].

Бурение глубоких скважин во льду ведется с использованием различных низкотемпературных жидкостей (заливочные жидкости – ЗЖ), которые заливают в скважину с устья. ЗЖ обеспечивают компенсацию литостатического (горного) давления и являются очистным агентом. Без них бурение глубоких скважин невозможно, так как лед является пластично-хрупкой горной породой, в которой особенно активно проявляются пластические деформации при высоких давлениях и температурах массива, близких к температурам плавления. Вследствие этого уменьшается диаметр скважины, что приводит к осложнениям и авариям.

Низкотемпературные жидкости можно разделить на четыре основные группы (рис.1): двухкомпонентные жидкости на основе углеводородов с добавлением утяжелителя, спиртовые соединения, сложноэфирные соединения и силиконовые масла [20, 21]. Большинство этих жидкостей являются экологически небезопасными. Например, наиболее распространенная ЗЖ – смесь углеводородов, используемая в скважине 5Г, несмотря на преимущества (дешевизна, низкая вязкость, регулируемая в широком диапазоне плотность, инертность по отношению ко льду, гидрофобность), создана на основе авиационного топлива (ТС-1, Jet A-1) и является высокотоксичным соединением, а применяемые утяжелители класса фторуглеродов (фреон HCFC-141b) оказывают отрицательное воздействие на озоновый слой Земли [22].

Вскрытие подледниковых водоемов базируется на принципе недокомпенсации давления, которая представляет собой разницу между литостатическим давлением $P_г$ (давление льда) и гидростатическим $P_{гст}$ (давление столба ЗЖ). Литостатическое давление должно быть больше гидростатического. Соблюдение данного условия обеспечивает при вскрытии подъем воды из озера в скважину, а ее поступление продолжается до момента, пока не наступит баланс давлений «жидкость в скважине – озеро» [23-25].

В момент вскрытия струя озерной воды, поступающая в скважину, активно перемешивается с ЗЖ, образуя эмульсию. Причем чем больше значение дифференциального давления, тем выше

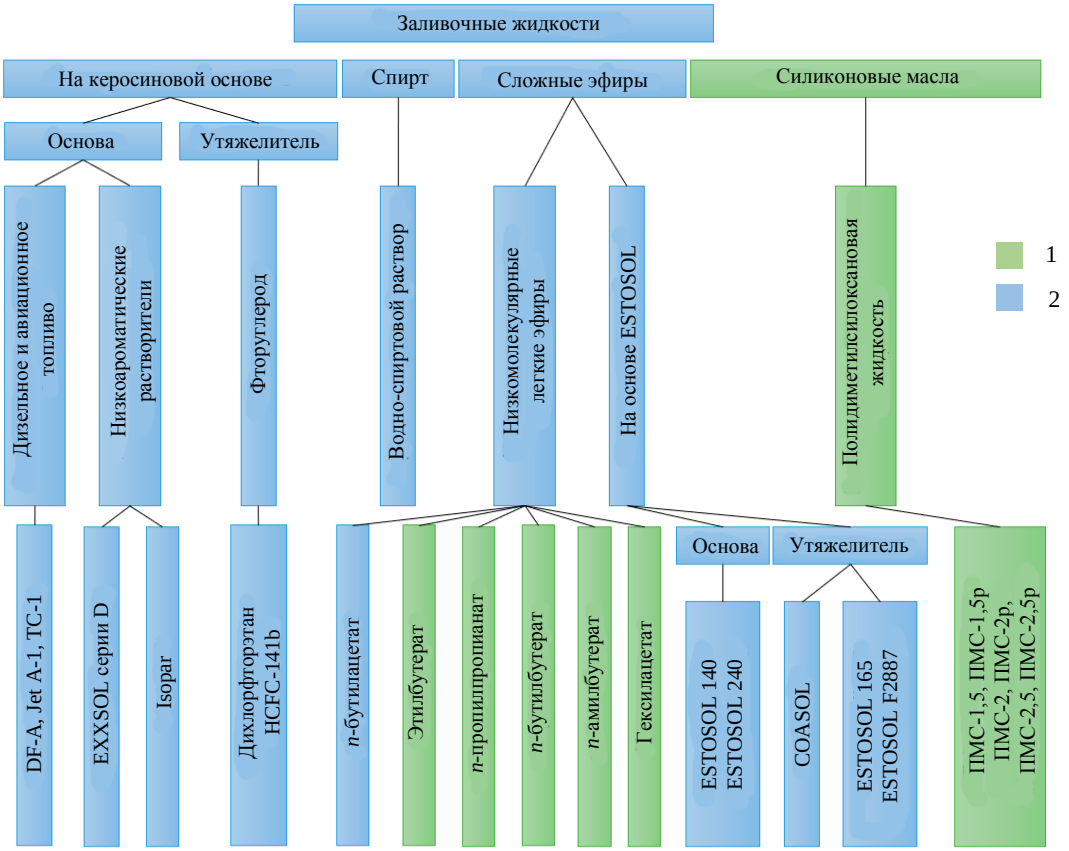


Рис.1. Классификация заливочных жидкостей [20]

1 – используемые в бурении; 2 – перспективные

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

первоначальная скорость струи, и, соответственно, скорость и высота подъема озерной воды в скважину [25]. Эмульсия представляет собой смесь воды и более холодной ЗЖ, которая может способствовать более быстрому замерзанию, в сравнении с чистой водой, а также к загрязнению озерной воды в скважине, что не позволит отобрать чистые пробы [26-28].

Вскрытие также может осложниться образованием гидратов, которое затрудняет перемещение оборудования в скважине и повышает риски прихвата инструмента. С поверхности дна озера поступают пластовые воды, содержащие газы органического и неорганического происхождения, выступающие в роли гидратообразователя. Рост гидратной фазы происходит при определенных термобарических условиях и наличии гидратообразующих веществ, а ускоряют этот процесс высокие скорости потока, перемешивание, центры кристаллизации и свободная вода. Во время вскрытия подледниковых водоемов происходит активное перемешивание, что при наличии большой площади поверхности контакта озерной воды и холодной ЗЖ приводит к образованию твердых гидратов [29-31].

Образование гидратов обусловлено как химическим взаимодействием воды и ЗЖ, так и бюджетом атмосферных газов – кислорода и азота, которые поступают в озеро с талой водой [32, 33]. Например, в 2012 и 2015 годах при вскрытии подледникового озера Восток образовывался столб клатратов фреона, который разделял озерную воду и ЗЖ. Термобарические условия на контакте системы «озеро – ледник» являются оптимальными для образования многих видов гидратов. В работе [32] косвенно оценен объем и концентрация атмосферных газов, поступающих в озеро, однако прямые измерения не проводились ввиду отсутствия доступа к подледниковому пространству.

В данной статье рассматривается применение перспективных экологически чистых ЗЖ – силиконовых (кремнийорганических) жидкостей (масел) [34]. Силиконовые жидкости прозрачны, бесцветны, не имеют запаха, практически нерастворимы в воде и весьма устойчивы к химической и окислительной деградации [35]. Они имеют широкий спектр промышленного, потребительского, пищевого и фармацевтического применения как в чистом виде, так и в качестве ингредиента в составе готового продукта. Часто силиконовые добавки можно встретить в составе косметических средств. Многие поставщики используют эти силиконовые жидкости для создания своих собственных промышленных смесей и эмульсий, но силиконовые жидкости производятся лишь несколькими компаниями в мире и являются товарным продуктом.

Силиконовые жидкости используются в пищевой промышленности, например, пищевая добавка E900 представляет собой жидкий полидиметилсилоксан (ПМС) и является пеногасителем при промышленном производстве продуктов питания. Добавка применяется как связующий агент, стабилизатор, текстуратор, антикомкователь и антислеживатель, что подтверждает ее экологическую безопасность [22, 36]. ПМС также используют в качестве добавки к буровым растворам при бурении эксплуатационных скважин на нефть и газ [21]. Развитие и инвестирование производства кремнийорганических жидкостей с каждым годом неуклонно растет, что в итоге может привести к рациональному распределению их изготовления с учетом потребления, логистики и энергообеспеченности процессов, особенно в быстрорастущих азиатских регионах, а также открытию новых направлений применения (например, в бурении глубоких скважин во льдах Арктики и Антарктики [37, 38]).

К преимуществам ПМС относят экологическую чистоту, нетоксичность, гидрофобность, смешиваемость, сохранение плотностных и реологических характеристик в широком диапазоне температур, к недостаткам – высокая стоимость, низкая скорость испарения, высокая сжимаемость и значительное изменение плотности в зависимости от температуры.

Новым технологическим решением ПМС является использование в качестве ЗЖ при бурении глубоких скважин во льду [20]. Специалисты из России, Китая, США и Европы проводят всесторонние исследования: взаимодействие ПМС с ледяным шламом, выбор марки и производителя для конкретных условий бурения по плотностным и реологическим свойствам, проводят экспериментальное бурение, изучают влияние на гидравлическую систему и взаимодействие с материалами и др.

В настоящее время не существует реализованных проектов бурения скважин с применением ПМС [21], поэтому процессы бурения льда и вскрытия подледниковых водоемов с использованием ПМС линейного строения до сих пор остаются малоизученными. Моделирование и прогнозирование процессов вскрытия подледниковых водоемов с обеспечением технологических и экологических требований требует подробного рассмотрения ключевых задач исследования процессов образования и разрушения эмульсий (воды и ПМС) и газовых гидратов. Объектом исследования является

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 136-146
© Д.В.Сербин, Г.В.Буслаев, А.Ю.Лаврик, В.Г.Кадочников, А.Н.Дмитриев, 2025

взаимодействие ПМС и озерной воды при вскрытии подледниковых водоемов, а предметом – процессы образования и разрушения эмульсий и газовых гидратов. Цель исследования заключается в определении влияния температуры жидкостей, интенсивности их перемешивания и типа газа на процессы образования и разрушения эмульсий и газовых гидратов с учетом термобарических условий на контакте ледника и подледникового озера Восток.

Методы исследования

В качестве исследуемой жидкости использовалась кремнийорганическая жидкость WACKER AK-10 (ПМС-10 в российской классификации по ГОСТ 13032-77) от немецкой химической компании Wacker Chemie (табл.1).

Таблица 1

Технические характеристики кремнийорганической жидкости WACKER AK-10 при T = 25 °C [9]

Параметр	Показатель	Метод определения
Видимость	Бесцветный, чистый	–
Плотность, г/см^3	0,93	DIN 51757
Температура кипения, °C	180	ISO 2592
Температура воспламенения (жидкости), °C	365	EN 14522
Температура застывания, °C	–80	DIN 51794
Поверхностное натяжение, Н/м	0,020	DIN 53914
Кинетическая вязкость, мм^2/с	10	DIN 53019
Динамическая вязкость, МПа·с	9,3	
Коэффициент теплового расширения при 0-150 °C, м$^2\cdot10^{-4}$/(м$^2\cdot$ °C)	10	

Исследования проводились с использованием лабораторного оборудования научного центра «Арктика» Горного университета. На первоначальном этапе в лабораторных условиях определялись плотностные и реологические свойства исследуемой жидкости. Плотность WACKER AK-10 измерялась двумя независимыми методами: при помощи электронного плотномера Mettler Toledo Density meter Easy D40 и ареометра АОН-1; температура – с использованием цифрового термометра ЛТ-300; вязкость – вискозиметра Fann 35SA. Образование и разрушение эмульсий и газовых гидратов изучались с использованием немецкой газогидратной автоклавной системы Gas Hydrate Autoclaves GHA-350, которая включает автоклав GHA-350, верхнеприводную мешалку, термостат Huber Ministat 240, газовые бустеры с максимальным давлением 15 и 40 МПа, систему приготовления модельного газа, три видеокамеры и компьютер. Газогидратная автоклавная система позволяет создать термобарические условия, близкие к условиям в точке вскрытия подледникового озера Восток скважиной 5Г (давление 33,78±0,05 МПа; температура плавления льда на контакте ледника с озером –2,72±0,10 °C [8]; объем жидкостей в автоклаве – вода 200 мл, ПМС 125 (200) мл). В воду предварительно добавлялся концентрат красителя – метиленовый синий – для лучшей визуализации процесса. В качестве газа для создания давления использовались азот, гелий и их смесь в соотношении 1:1. В качестве озерной воды использовалась вода, полученная из керна озерного льда скважины 5Г на станции Восток. Лабораторные исследования проводились с видеозаписью процессов образования и разрушения эмульсии при давлении P = 35,0±0,2 МПа с изменением частоты вращения мешалки n от 100 до 700 об/мин и температуры эмульсий $T_э$ от –3,5 до 60 °C. Время перемешивания жидкостей составляло 60 с (подобрано экспериментально таким образом, чтобы эмульсия при дальнейшем перемешивании не изменяла своей дисперсности). Опыты при одинаковых $PT_э$ условиях проводились 1-4 раз. По окончании опытов проводилась визуальная обработка всех видеозаписей.

Обсуждение результатов

Результаты измерений плотностных и реологических свойств WACKER AK-10 при T = 25 °C: плотность 0,9359 г/см^3; кинетическая вязкость 10 мм^2/с. Проведено 10 серий (168 опытов, из них семь опытов с длительностью видеозаписи 20-600 мин) лабораторных исследований процесса образования и разрушения эмульсий.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Д.В.Сербин, Г.В.Буслаев, А.Ю.Лаврик, В.Г.Кадочников, А.Н.Дмитриев, 2025

Интенсивность перемешивания имеет большое влияние на дисперсность эмульсии. Перемешивание WACKER AK-10 и воды при P = 35 МПа и частоте вращения n < 200 об/мин приводит к образованию полидисперсных эмульсий, а при частоте вращения $n \geq$ 200-400 об/мин (диапазон обусловлен изменением $T_э$) образуются монодисперсные эмульсии. Увеличение частоты вращения мешалки приводит к уменьшению размеров глобул эмульсии. На рис.2, *а* представлена эмульсия в момент остановки мешалки, образованная при $T_э$ = 0 °С, P = 35 МПа и n = 100 об/мин, которая характеризуется полидисперсностью, так как глобулы имеют разные размеры (0,2-6 мм). Эмульсия на рис.2, *б*, образованная при T = 0 °С, P = 35 МПа и n = 700 об/мин является монодисперсной, размеры ее глобул составляют 1-2 мм.

Понижение температуры перемешиваемых жидкостей $T \leq$ 10 °С приводит к образованию мелкодисперсных эмульсий с размерами глобул 0,1-0,5 мм (рис.2, *в*, *г*). Понижение температуры жидкостей до 0 °С и ниже в редких случаях приводит к образованию множественных эмульсий типа М/В/М

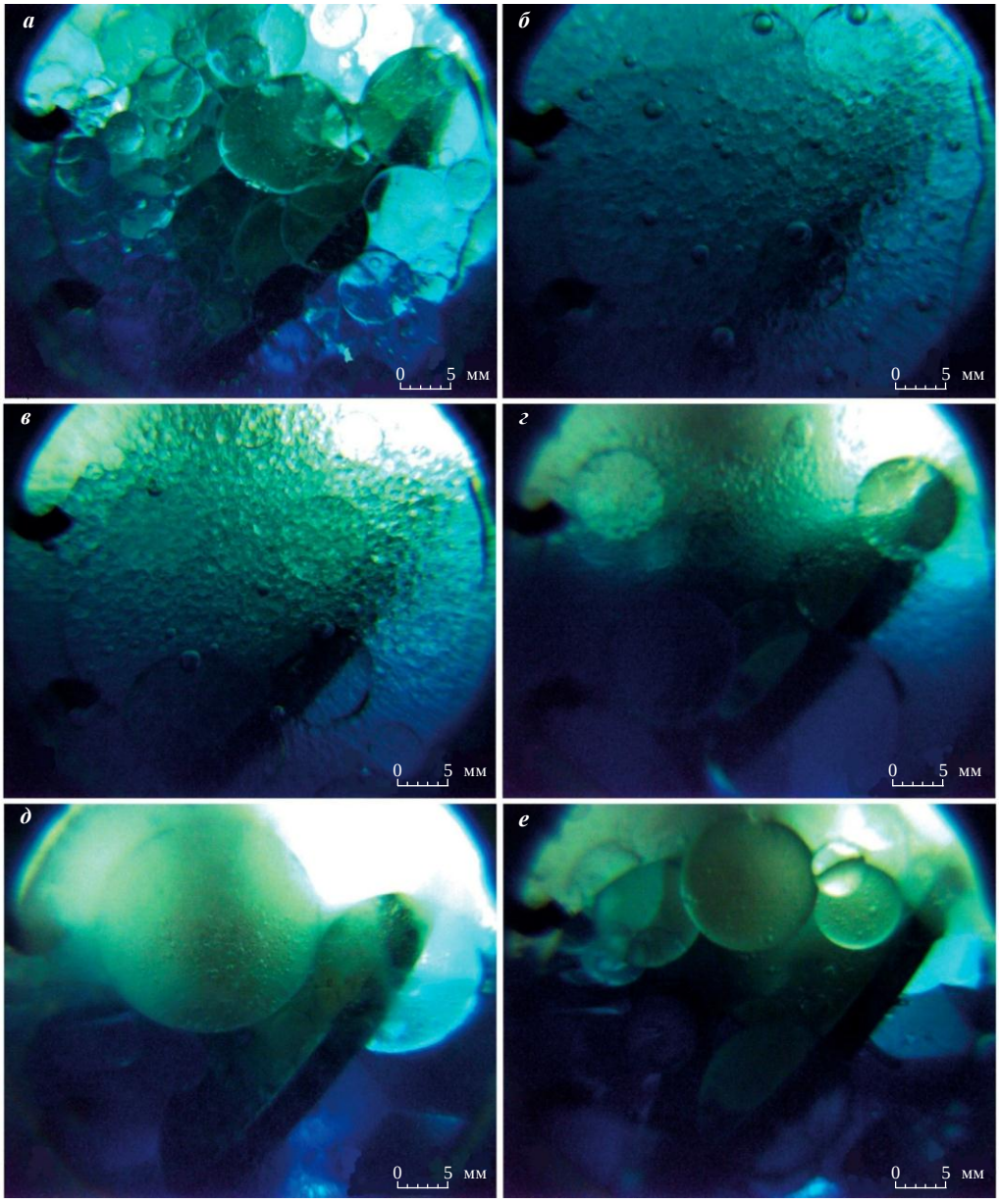


Рис.2. Результаты образования и разрушения эмульсий и воды: *а* – вид эмульсии в момент остановки мешалки при T = 0 °С и n = 100 об/мин; *б* – вид эмульсии в момент остановки мешалки при T = 0 °С и n = 700 об/мин; *в* – образование мелкодисперсных эмульсий в процессе разрушения при T = 0 °С и n = 600 об/мин; *г* – образование мелкодисперсных эмульсий в процессе разрушения при T = –3,5 °С и n = 400 об/мин; *д* – образование эмульсии типа М/В/М при T = –2,8 °С и n = 100 об/мин; *е* – образование эмульсии типа М/В/М при T = –3,5 °С и n = 150 об/мин

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 136-146
© Д.В.Сербин, Г.В.Буслаев, А.Ю.Лаврик, В.Г.Кадочников, А.Н.Дмитриев, 2025

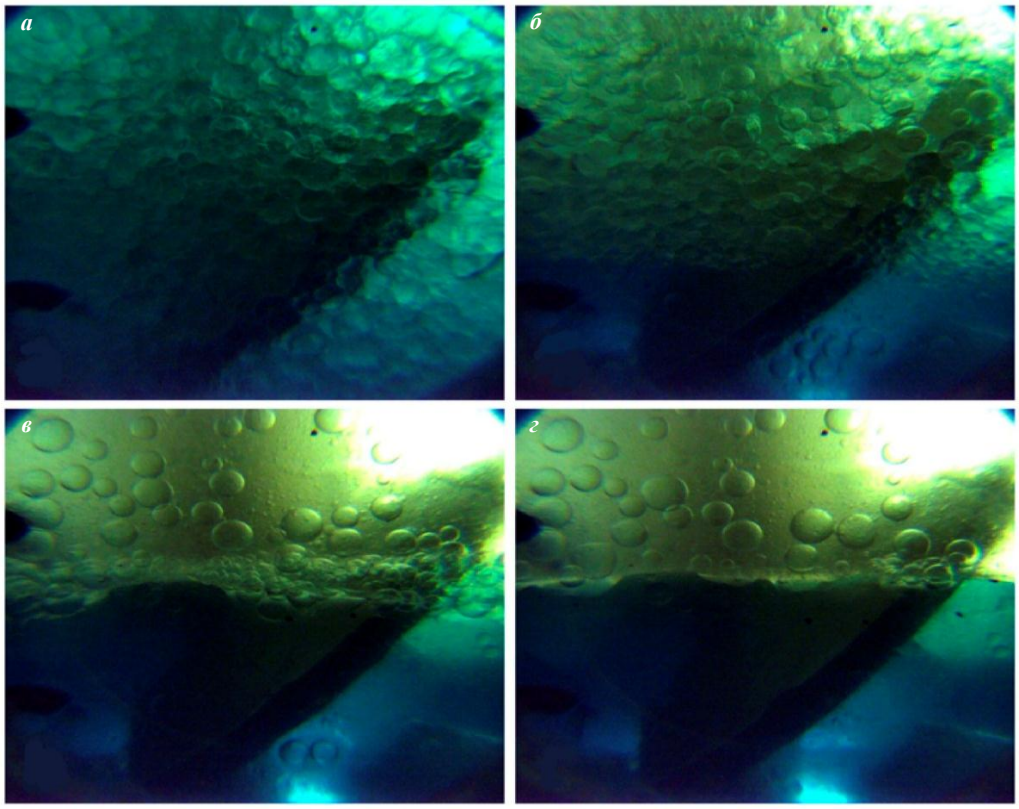


Рис.3. Процесс разрушения эмульсии WACKER AK-10 и воды при P = 35 МПа, T = 10 °С, n = 250 об/мин: *а* – 10 с; *б* – 30 с; *в* – 60 с; *г* – 84 с (полное разрушение эмульсии)

Видео по ссылке https://pmi.spmi.ru/pmi/article/download/16610/16637

(масло – в воде – в масле). На рис.2, *д*, *е* представлены эмульсии, диаметр большой глобулы воды которой составляет 6,75 мм с маленькими глобулами кремнийорганической жидкости внутри диаметром 0,05-0,30 мм. Как правило, время жизни таких отдельных глобул не превышает 5 мин.

Процесс разрушения эмульсии представлен на рис.3. После остановки перемешивания наблюдается активное слияние глобул воды и образование более крупных, превышающих первоначальный размер в 2-7 раз, при этом проявляется кинетическая неустойчивость, приводящая к кремажу эмульсий (процесс всплывания частиц дисперсной фазы под влиянием силы тяжести; в данном случае дисперсной фазой является вода) с последующей коалесценцией.

Процесс слияния (коалесценции) двух глобул с образованием новой, большей по размеру, глобулы запечатлен на рис.4. При появлении в кадре четкой границы раздела эмульсии и воды на ней образуется мелкодисперсная эмульсия. Слой глобул постепенно уменьшается и в итоге образуются более крупные образования – флокулы и глобулы – совокупность нескольких макромолекул. Флокулы разрушаются в первые минуты, а время существования отдельных глобул может доходить до десятков часов. Отдельные глобулы, которые дольше всего существуют, находятся на контакте двух жидкостей и твердой поверхности, что приводит к их последующему слиянию.

Результаты лабораторных исследований времени разрушения эмульсии представлены в табл.2 и рис.5. При частоте вращения мешалки в интервале 150-300 об/мин с использованием азота наблюдаются верхние экстремумы времени разрушения эмульсий, которые падают до минимальных значений при n = 400 об/мин. При n > 400 об/мин зависимость от частоты вращения уменьшается и становится линейной, особенно это проявляется при $T_э$ = 30-60 °С. Также наблюдается смещение экстремумов времени разрушения эмульсии в зависимости от частоты вращения мешалки, так при $T_э$ = 60 °С экстремум достигается при n = 300 об/мин, а при $T_э$ = 10 °С экстремум находится при n = 150 об/мин. На рис.5 представлены зависимости времени разрушения эмульсии от частоты вращения мешалки с использованием гелия. Прослеживается линейная слабовосходящая зависимость, и для этих данных разработаны математические модели с целью определения времени разрушения эмульсии y в зависимости от температуры жидкостей T и частоты вращения мешалки x:

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Д.В.Сербин, Г.В.Буслаев, А.Ю.Лаврик, В.Г.Кадочников, А.Н.Дмитриев, 2025

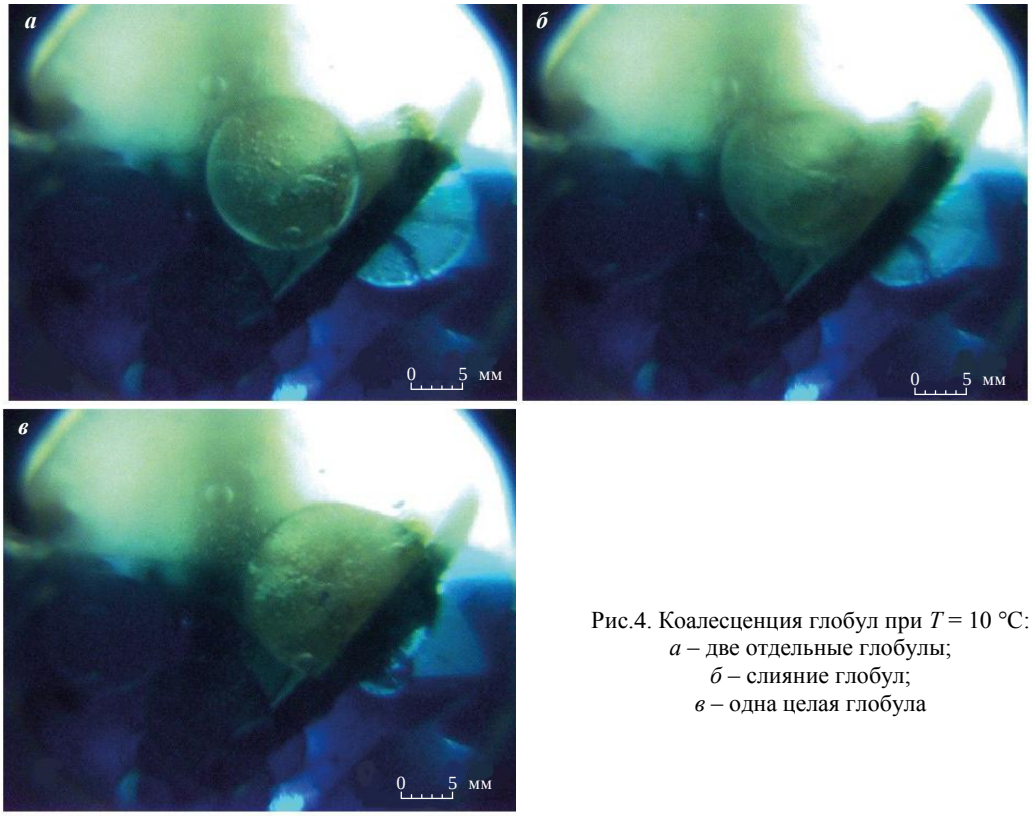


Рис.4. Коалесценция глобул при T = 10 °С:
а – две отдельные глобулы;
б – слияние глобул;
в – одна целая глобула

$$T = 10\ °C,\ y = 0{,}2696x + 29{,}329;$$

$$T = 0\ °C,\ y = 0{,}2673x + 70{,}971;$$

$$T = -2{,}8\ °C,\ y = 0{,}3194x + 71{,}757;$$

$$T = -3{,}5\ °C,\ y = 0{,}1642x + 93{,}485.$$

Эти модели представляют наибольший интерес, так как по *PT* условиям близки к условиям на контакте подледникового озера Восток и ледника.

Таблица 2

Результаты лабораторных исследований процесса разрушения эмульсии WACKER AK-10 (ПМС-10) и воды

№ п/п	Частота вращения n, об/мин	Газ, используемый для создания давления в автоклаве									
		Азот (N_2)						N_2+He	Гелий (He)		
		Объем жидкости в автоклаве									
		125 мл ЗЖ + 200 мл воды						200 мл ЗЖ + 200 мл воды			
		Среднее время разрушения эмульсии $t_{рэ}$ при различных температурах, с									
		60 °С	50 °С	40 °С	30 °С	20 °С	10 °С	10 °С	0 °С	–2,8 °С	–3,5 °С
1	100	0,0	0,0	28,0	31,0	32,0	90,5	59,3	82,5	106,0	–
2	150	–	60,0	61,0	92,0	102,0	148,3	86,0	89,0	102,0	115,0
3	200	92,0	85,7	117,0	112,0	72,0	107,8	79,0	118,0	128,5	125,0
4	250	–	102,0	118,0	80,3	78,0	91,7	89,0	149,0	144,0	140,0
5	300	108,5	57,0	57,0	66,5	70,5	96,0	93,5	151,5	157,0	140,0
6	350	–	–	–	58,5	74,0	90,0	106,0	174,5	180,0	155,0
7	400	41,5	37,0	38,0	53,5	74,5	80,0	143,0	209,0	235,0	165,0
8	500	41,8	39,0	39,0	50,0	100,0	83,0	184,5	240,0	279,0	170,0
9	600	–	43,0	42,0	54,0	97,0	93,3	210,0	225,0	270,0	182,0
10	700	45,8	42,0	50,0	60,0	107,0	102,5	200,0	220,0	250,0	216,0

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 136-146
© Д.В.Сербин, Г.В.Буслаев, А.Ю.Лаврик, В.Г.Кадочников, А.Н.Дмитриев, 2025

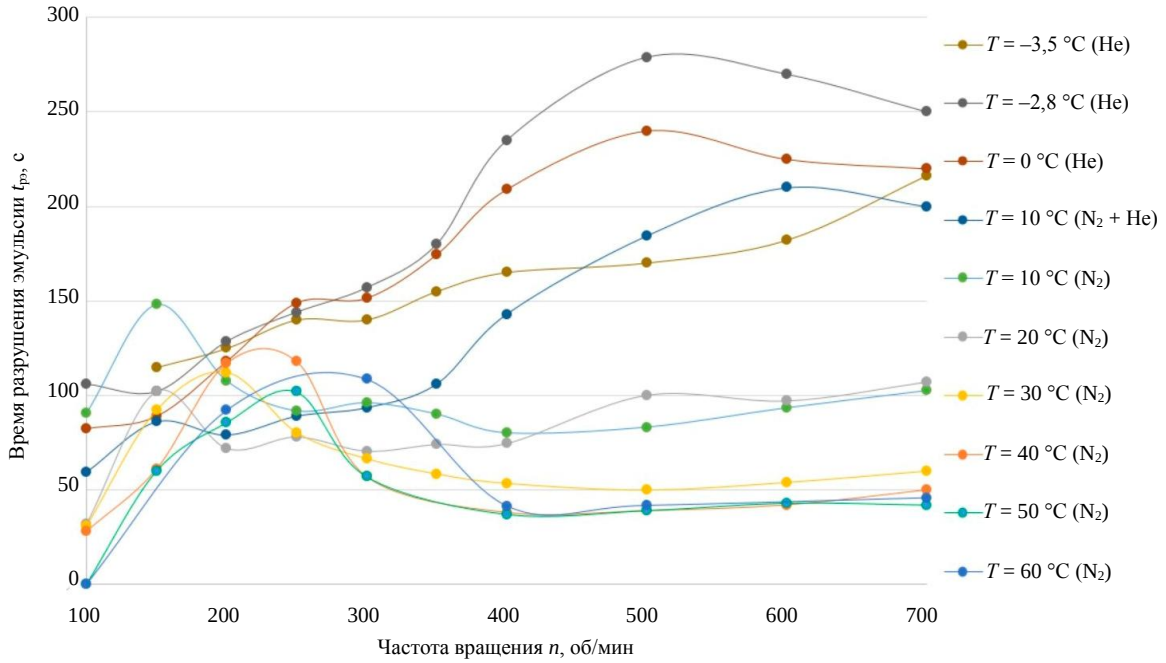


Рис.5. Зависимости времени разрушения эмульсии из WACKER AK-10 и воды от частоты вращения мешалки при T = –3,5-60,0 °C и P = 35 МПа

Изменение вида газа и увеличение объема пробы WACKER AK-10 от 125 до 200 мл приводит к увеличению времени разрушения эмульсии. В диапазоне частот вращения 100-250 об/мин наблюдается минимальное время разрушения эмульсии при использовании гелия, в диапазоне 250-300 об/мин время разрушения эмульсии для гелия и азота одинаковое, а выше 300 об/мин эмульсии с гелием разрушаются в два раза медленнее, чем эмульсии с использованием азота.

Понижение температуры жидкостей приводит к увеличению времени разрушения эмульсии, особенно это проявляется при температуре $T_э \leq 20$ °C и ниже. Например, изменение температуры от 30 до 10 °C при одинаковой интенсивности перемешивания n = 700 об/мин увеличивает время разрушения эмульсии в два раза.

Исследования процесса образования и разрушения (диссоциации) гидратов в смеси воды, кремнийорганической жидкости и газа в условиях, приближенных к условиям поверхности подледникового озера Восток, проводились с использованием газогидратной автоклавной системы. Учитывая технологию вскрытия подледниковых водоемов и термобарические условия образования гидратов, нужный интервал температур составляет от –10 до +10 °C. По результатам лабораторных исследований установлено: гидраты азота образуются при P = 35±0,5 МПа и $T \leq$ –1 °C, это означает, что при наличии достаточного объема азота во льду еще до вскрытия могут образоваться гидраты азота. В смеси азота и гелия в соотношении 1:1 при P = 35±0,5 МПа и $T \leq$ –2,8 °C также образуются гидраты, с учетом инертности гелия образованные соединения являются гидратами азота.

Добавление инертного газа – гелия – в азот привело к сдвигу PT условий образования твердых газовых гидратов в сторону уменьшения температуры. Использование гелия для создания давления в автоклаве и наличие остаточного азота в жидкостях привело к образованию гидрата азота при P = 35±0,5 МПа и $T \leq$ –5 °C (рис.6, 7, *а*), в данном случае точное содержание азота установить сложно. В некоторых опытах увеличение частоты вращения мешалки приводило к ее прихвату в автоклаве, в результате чего опыт заканчивался. Это происходило из-за мгновенной интенсификации процесса образования большого количества гидратов за счет активного перемешивания воды и кремнийорганической жидкости. Данное явление особенно необходимо учитывать при разработке технологий бурения скважин во льдах и вскрытия подледниковых водоемов.

Известно, что диссоциация газовых гидратов инициируется за счет уменьшения давления или повышения температуры. После понижения давления в автоклаве с 35 до 25 МПа наблюдается выделение пузырьков газа малого размера 0,2-0,8 мм из гидратов и накопление их в замкнутом

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

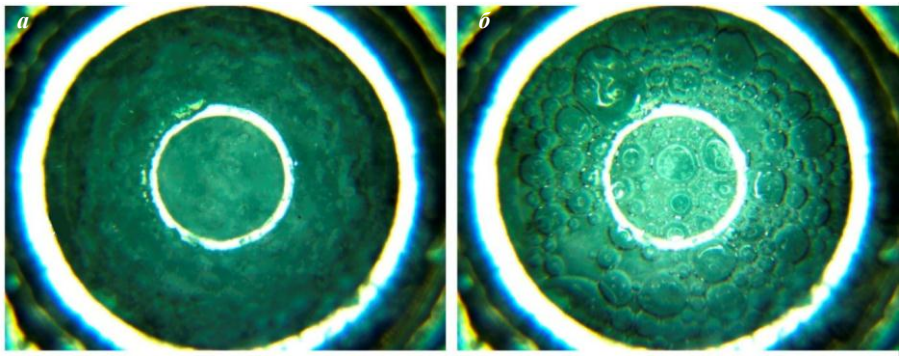


Рис.6. Образование и разрушение гидрата азота: *а* – до диссоциации; *б* – после диссоциации гидратов азота при $T = -5$ °С и $P = 25$ МПа

пространстве (рис.7, *б*). Пузырьки сливаются и формируют большие пузырьки размером 1-5 мм. По накоплении критического объема газа (через 70-90 с после начала изменения давления) пузырьки разрушаются, и газ вырывается наверх (рис.7, *в*). Процесс диссоциации интенсифицируется с высвобождением первых пузырьков, и через 30-40 с наблюдается увеличение их размера с 0,2-0,8 до 0,8-5 мм (рис.7, *г*), они покрывают более 70 % поверхности смотрового окна. Слияние маленьких пузырьков в большие и их высвобождение продолжается 40-60 с, после чего размер образующихся пузырьков вновь уменьшается до 0,2-0,8 мм, и образуются отдельные слияния в пузырьки до 5 мм (рис.7, *д*, *е*).

Понижение температуры в автоклаве $T \leq 0$ °С и образование льда/гидратов на внутренней стороне смотровых окон для видеокамер приводит к конденсации с наружной стороны. Это мешает визуальному наблюдению за процессами, что необходимо учитывать в дальнейших исследованиях.

Заключение

Проведен комплекс исследований, направленный на изучение образования и разрушения эмульсий и газовых гидратов при взаимодействии двух жидкостей (воды и кремнийорганической жидкости) и создания давления с помощью гелия и/или азота, которое носило характер опытно-методических работ, поскольку лабораторные исследования эмульсий и газовых гидратов в термобарических условиях, приближенных к условиям на контакте ледника и подледникового озера Восток, не проводились.

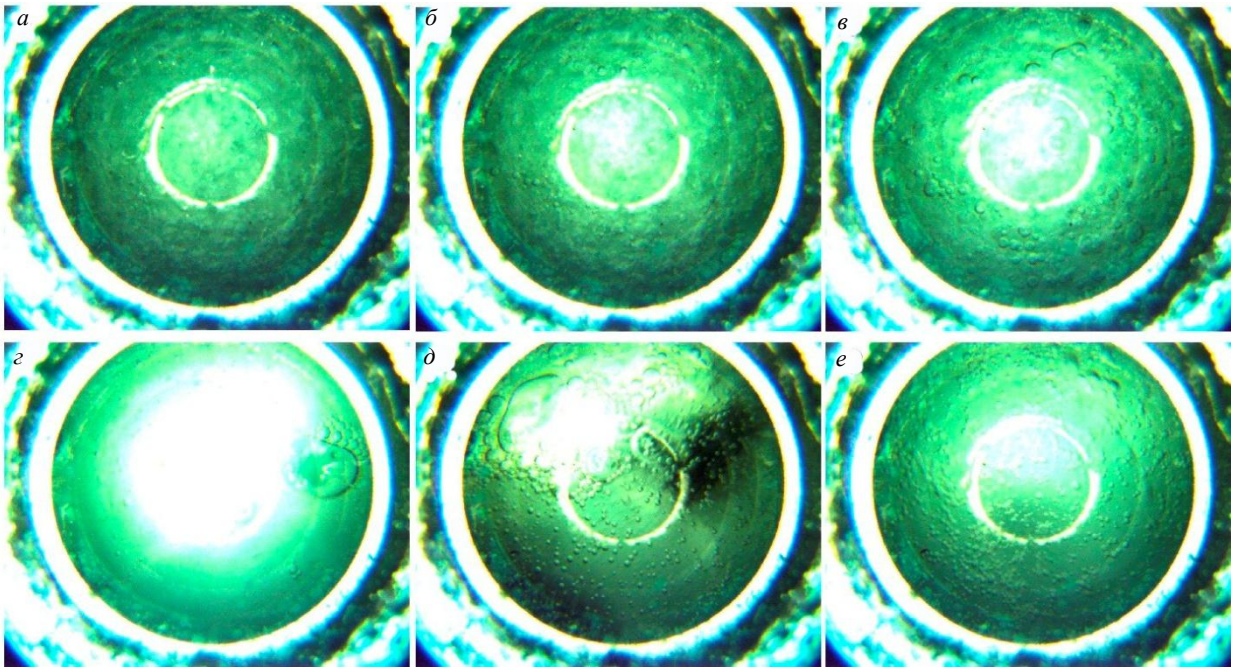


Рис.7. Диссоциация гидрата азота при $T = 0$ °С и $P = 25$ МПа по истечении времени: *а* – 0 мин; *б* – 1 мин; *в* – 2 мин; *г* – 3 мин; *д* – 4 мин; *е* – 5 мин

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 136-146
© Д.В.Сербин, Г.В.Буслаев, А.Ю.Лаврик, В.Г.Кадочников, А.Н.Дмитриев, 2025

Изучено влияние температуры жидкостей, интенсивности перемешивания и типа газа на процессы образования и разрушения эмульсий из воды и WACKER AK-10:

• наблюдается низкая термодинамическая и кинетическая устойчивость исследуемой эмульсии;

• интенсивность перемешивания во многом влияет на дисперсность (с увеличением интенсивности перемешивания уменьшаются размеры глобул) и время разрушения эмульсий (опыты с использованием азота показали точки максимума при частоте вращения мешалки n = 150-300 об/мин, с использованием гелия при частоте вращения мешалки n = 600-700 об/мин).

Выводы

Апробированная методика лабораторных исследований с использованием комплекса Gas Hydrate Autoclaves GHA 350 является применимой для изучения процессов образования и разрушения эмульсий и газовых гидратов. В лабораторных условиях с использованием современного поверенного оборудования измерены плотностные и реологические свойства исследуемой кремнийорганической жидкости WACKER AK-10 при T = 25 °С: плотность – 0,9359 г/см³, кинетическая вязкость – 10 мм^2/с.

Установлено, что понижение температуры эмульсии приводит к увеличению времени ее разрушения, образованию микроэмульсий, которые характеризуются снижением межфазного натяжения между водной и органической фазами до сверхнизких значений и множественных эмульсий типа М/В/М, особенно это проявляется при $T_э \leq 10$ °С. Среднее время разрушения эмульсии составило 107 с. Минимальное время разрушения эмульсии наблюдается при минимальной частоте вращения мешалки n = 100 об/мин и максимальной температуре $T_э$ = 60 °С, а максимальное время разрушения эмульсии наблюдается при частоте вращения мешалки n = 500 об/мин и температуре $T_э$ = –2,8 °С.

Установлено, что гидраты азота образуются при давлении P = 35±0,5 МПа и температуре $T \leq -1$ °С. Добавление инертного газа – гелия – в азот приводит к сдвигу PT условий образования гидратов азота – с соотношением газов 1:1 гидраты азота образуются при P = 35±0,5 МПа и $T \leq -2{,}8$ °С.

Исследования процессов образования и разрушения эмульсий и газовых гидратов являются актуальными и значимыми при разработке технологии экологически безопасного и безаварийного вскрытия подледниковых водоемов с использованием кремнийорганических жидкостей.

При проведении дальнейших исследований необходимо использовать другие марки кремнийорганических жидкостей, например ПМС-1,5, ПМС-2,0, ПМС-2,5, ПМС-3,0, ПМС-1,5р, ПМС-2,0р, ПМС-2,5р, представляющие наибольший интерес с точки зрения применимости при вскрытии подледникового озера Восток.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В.* Отечественные геофизические исследования подледникового озера Восток, Восточная Антарктида // Вопросы географии. 2020. Сборник 150. С. 212-224.

2. *Siegert M.J.* A 60-year international history of Antarctic subglacial lake exploration // Geological Society, London, Special Publications. 2018. Vol. 461. P. 7-21. DOI: 10.1144/SP461.5

3. *Большунов А.В., Васильев Н.И., Тимофеев И.П. и др.* Перспективное технологическое решение по отбору проб донных отложений подледникового озера Восток: актуальность и постановка задач исследований // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 779-787. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.1

4. *Livingstone S.J., Yan Li, Rutishauser A. et al.* Subglacial lakes and their changing role in a warming climate // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. Iss. 2. P. 106-124. DOI: 10.1038/s43017-021-00246-9

5. *Talalay P.G., Markov A.N.* Thermobaric Conditions at Ice-Water Interface in Subglacial Lake Vostok, East Antarctica // Natural Resources. 2015. Vol. 6. № 6. P. 423-432. DOI: 10.4236/nr.2015.66040

6. *Литвиненко В.С.* Уникальные техника и технологии бурения скважин во льдах Антарктиды // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 5-10.

7. *Malczyk G., Gourmelen N., Werder M. et al.* Constraints on subglacial melt fluxes from observations of active subglacial lake recharge // Journal of Glaciology. 2023. Vol. 69. Iss. 278. P. 1900-1914. DOI: 10.1017/jog.2023.70

8. *Mikucki J.A., Lee P.A., Ghosh D. et al.* Subglacial Lake Whillans microbial biogeochemistry: a synthesis of current knowledge // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. № 20140290. DOI: 10.1098/rsta.2014.0290

9. *Yan Zhou, Xiangbin Cui, Zhenxue Dai et al.* The Antarctic Subglacial Hydrological Environment and International Drilling Projects: A Review // Water. 2024. Vol. 16. Iss. 8. № 1111. DOI: 10.3390/w16081111

10. *Griffiths H.J., Anker P., Linse K. et al.* Breaking All the Rules: The First Recorded Hard Substrate Sessile Benthic Community Far Beneath an Antarctic Ice Shelf // Frontiers in Marine Science. 2021. Vol. 8. № 642040. DOI: 10.3389/fmars.2021.642040

11. *Васильев Н.И., Лейченков Г.Л., Загривный Э.А.* Перспективы получения образцов донных отложений подледникового озера Восток // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 199-208. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.199

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

12. *Siegert M.J., Ross N., Le Brocq A.M.* Recent advances in understanding Antarctic subglacial lakes and hydrology // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. № 20140306. DOI: 10.1098/rsta.2014.0306

13. *Bulat S.A.* Microbiology of the subglacial Lake Vostok: first results of borehole-frozen lake water analysis and prospects for searching for lake inhabitants // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. № 20140292. DOI: 10.1098/rsta.2014.0292

14. *Игнатьев С.А., Васильев Д.А., Большунов А.В. и др.* Экспериментальные исследования переноса ледяного шлама воздухом при бурении снежно-фирновой толщи // Лед и Снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 141-152. DOI: 10.31857/S2076673423010076

15. *Большунов А.В., Васильев Д.А., Игнатьев С.А. и др.* Механическое бурение ледников с очисткой забоя сжатым воздухом // Лед и Снег. 2022. Т. 62. № 1. С. 35-46. DOI: 10.31857/S2076673422010114

16. *Коробов Г.Ю., Воронцов А.А.* Исследование условий образования газогидратных и асфальтосмолопарафиновых отложений при добыче нефти механизированным способом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 10. С. 61-75. DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4181

17. *Bolobov V., Martynenko Y., Yurtaev S.* Experimental Determination of the Flow Coefficient for a Constrictor Nozzle with a Critical Outflow of Gas // Fluids. 2023. Vol. 8. Iss. 6. № 169. DOI: 10.3390/fluids8060169

18. *Шишкин Е.В., Большунов А.В., Тимофеев И.П. и др.* Модель шагающего пробоотборника для исследования донной поверхности подледникового озера Восток // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 853-864. DOI: 10.31897/PMI.2022.53

19. *Litvinenko V., Trushko V.* Modelling of geomechanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica // Antarctic Science. 2025. Vol. 37. Iss. 1. P. 39-48. DOI: 10.1017/S0954102024000506

20. *Talalay P.G.* Mechanical Ice Drilling Technology. Springer, 2016. 284 p. DOI: 10.1007/978-981-10-0560-2

21. *Triest J., Alemany O.* Drill fluid selection for the SUBGLACIOR probe: a review of silicone oil as a drill fluid // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 68. P. 311-321. DOI: 10.3189/2014AoG68A028

22. *Solomon S., Ivy D.J., Mills M.J. et al.* Emergence of healing in the Antarctic ozone layer // Science. 2016. Vol. 353. Iss. 6296. P. 269-274. DOI: 10.1126/science.aae0061

23. *Sukhanov A., Gansheng Yang, Vishniakov R., Vasilev N.* The electromechanical drill penetrates the subglacial lake Vostok – A Case Study // Oil Gas European Magazine. 2020. Vol. 46. Iss. 2. P. 12-16. DOI: 10.19225/200611

24. *Michaud A.B., Vick-Majors T.J., Achberger A.M. et al.* Environmentally clean access to Antarctic subglacial aquatic environments // Antarctic Science. 2020. Vol. 32. Iss. 5. P. 329-340. DOI: 10.1017/S0954102020000231

25. *Сербин Д.В.* Предотвращение образования эмульсии при вскрытии подледниковых водоемов // Известия Уральского государственного горного университета. 2021. Вып. 3 (63). С. 80-88. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-3-80-88

26. *Vasilev N.I., Timofeev I.P., Bolshunov A.V. et al.* Extension-Type Pulling-and-Running Gear for Investigations of Subglacial Lake Vostok // International Journal of Engineering and Technology. 2017. Vol. 9. № 4. P. 3330-3337. DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i4/170904424

27. *Липенков В.Я., Туркеев А.В., Екайкин А.А. и др.* Вскрытие подледникового озера Восток: уроки и выводы для будущих полномасштабных исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 4. С. 477-498 (in English). DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-4-477-498

28. *Lukin V.V., Vasiliev N.I.* Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 65. P. 83-89. DOI: 10.3189/2014AoG65A002

29. *Gizatullin R., Dvoynikov M., Romanova N., Nikitin V.* Drilling in Gas Hydrates: Managing Gas Appearance Risks // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 5. № 2387. DOI: 10.3390/en16052387

30. *Gaidukova O., Misyura S., Morozov V., Strizhak P.* Gas Hydrates: Applications and Advantages // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 6. № 2866. DOI: 10.3390/en16062866

31. *Alekhina I., Ekaykin A., Moskvin A., Lipenkov V.* Chemical characteristics of the ice cores obtained after the first unsealing of subglacial Lake Vostok // Geological Society, London, Special Publications. 2017. Vol. 461. P. 187-196. DOI: 10.1144/SP461.3

32. *Липенков В.Я., Туркеев А.В., Васильев Н.И. и др.* Температура плавления льда и газосодержание воды на контакте ледника с подледниковым озером Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 348-367. DOI: 10.30758/0555-2648-2021-67-4-348-367

33. *Fourteau K., Martinerie P., Faïn X. et al.* Estimation of gas record alteration in very low-accumulation ice cores // Climate of the Past. 2020. Vol. 16. Iss. 2. P. 503-522. DOI: 10.5194/cp-16-503-2020

34. *Talalay P.G.* Perspectives for development of ice-core drilling technology: a discussion // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 68. P. 339-350. DOI: 10.3189/2014AoG68A007

35. *Qinglei Wang, Huanrui Zhang, Zili Cui et al.* Siloxane-based polymer electrolytes for solid-state lithium batteries // Energy Storage Materials. 2019. Vol. 23. P. 466-490. DOI: 10.1016/j.ensm.2019.04.016

36. *Xiao-ying Zhang, Pei-ying Zhang.* Polymersomes in Nanomedicine – A Review // Current Nanoscience. 2017. Vol. 13. Iss. 2. P. 124-129. DOI: 10.2174/1573413712666161018144519

37. *Bohan Zhang, Jianfu Ma, Khan M.A. et al.* The Effect of Economic Policy Uncertainty on Foreign Direct Investment in the Era of Global Value Chain: Evidence from the Asian Countries // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 7. № 6131. DOI: 10.3390/su15076131

38. *Barykin S.E., Sergeev S.M., Provotorov V.V. et al.* Sustainability Analysis of Energy Resources Transport Based on A Digital N-D Logistics Network // Engineered Science. 2024. Vol. 29. № 1093. DOI: 10.30919/es1093

***Авторы*: Данил Васильевич Сербин,** *канд. техн. наук, ассистент, Serbin_DV@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-9855-7178* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Георгий Викторович Буслаев,** *канд. техн. наук, научный руководитель лаборатории, https://orcid.org/0000-0002-4987-8645* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Анна Юрьевна Лаврик,** *аспирант, https://orcid.org/0000-0001-7284-6003* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Вячеслав Григорьевич Кадочников,** *канд. техн. наук, ассистент, https://orcid.org/0000-0003-2892-3950* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Андрей Николаевич Дмитриев,** *канд. техн. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0003-4615-3179* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0