Прикладные проблемы

УДК 628.165:551.322 doi: 10.31857/S2076673420030053

Капельное вымораживание солёной воды при зимнем дождевании

© 2020 г. А.В. Сосновский*, Н.И. Осокин

Институт географии РАН, Москва, Россия
*alexandr_sosnovskiy@mail.ru

Desalination of salt water by drip freezing at winter sprinkling

A.V. Sosnovsky*, N.I. Osokin

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
*alexandr_sosnovskiy@mail.ru

Received January 7, 2020 / Revised March 11, 2020 / Accepted June 7, 2020

Keywords: ***Arctic, desalination, porous ice, salt water, winter sprinkling.***

Summary

The purpose of the research is to evaluate the efficiency of winter sprinkling for desalination of seawater. The ice fraction in an individual drop and in a stream of drops in a free fall is estimated. At the air temperatures of −10 and −40 °C, the percentage of ice in a stream of water drops with a mineralization of 35 g/l may amount to 12 and 39%, respectively. Calculations showed that when producing porous ice from water with a mineralization of 35 g/l by means of sprinkling at the same air temperatures, the productivity of the DDN–70 sprinkler system will be equal to 670 (−10 °C) and 2190 (−40 °C) tons of ice per day. When the fraction of ice in the drops of stream increases, the salinity of unfrozen water grows too, and this results in increasing of the porous ice salinity. Experiments did show that at mineralization of the source water of 10 g/l, the moisture content of porous ice amounts 12%, while in the ice frozen from seawater it is 23%. The humidity of a salt porous ice makes influence on the desalination efficiency. At a moisture content of porous ice of 12% and melting of 30% of its volume, the mineralization of the remaining part is 4 times less than that at the a moisture content of 23%, but if the melting reaches 50% of the volume it is 16 times. It was found that with growth of salinity of frozen water the performance of sprinkling and efficiency of desalinization decrease. However, it should be noted that when using sea water with a salinity of 35 g/l after melting of 50% of the porous ice volume, the salinity of the remaining part of water will amount approximately 1 g/l, and after appropriate sanitary and hygienic treatment, it can be used for drinking water supply. It is important also that such water will contain in sufficient amounts the necessary microelements.

Citation: Sosnovsky A.V., Osokin N.I. Desalination of salt water by drip freezing at winter sprinkling. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020. 60 (3): 471–480. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420030053.

Поступила 7 января 2020 г. / После доработки 11 марта 2020 г. / Принята к печати 7 июня 2020 г.

Ключевые слова: ***Арктика, зимнее дождевание, опреснение, пористый лёд, солёная вода.***

На основании математического моделирования определена динамика замерзания отдельной капли воды и дана оценка доли льда в капельном факеле. Рассчитана производительность намораживания пористого льда в зависимости от солёности намораживаемой воды и размера капель воды. Определена динамика опреснения массивов пористого льда разной солёности. Впервые оценена эффективность применения зимнего дождевания для опреснения морской воды.

Введение

Проблема загрязнения водных ресурсов и недостаток пресной воды актуальны для многих регионов, в том числе для арктических районов России, где часто для питьевого водоснабжения используется снег. В работе [1] рассмотрены проблемы водоснабжения в Арктике. Отмечается, что в последние годы исследователи обратили внимание на существенные нарушения водного обмена у населения арктических регионов, связанные с применением талого снега с недостаточным содержанием жизненно важных микроэлементов. Для решения проблемы водоснабжения всё чаще используют опреснение солёных, в частности, морских вод. Однако

известные в настоящее время способы очистки и опреснения природных и техногенных вод не эффективны для деминерализации и очистки больших объёмов промышленных, сельскохозяйственных и бытовых сточных вод из-за высокой себестоимости опреснённой воды, больших капитальных и энергетических затрат, необходимости предварительной очистки воды от нерастворимых примесей. На большей части территории России эти проблемы, а также другие природоохранные задачи могут успешно решаться с помощью нетрадиционных возобновляемых видов природной энергии, к которым относится и природный холод.

Один из известных способов опреснения – вымораживание воды с использованием естественного или искусственного холода. Опреснение воды вымораживанием известно с давних пор. В его основе лежит природный процесс разделения солёной воды при замораживании на пресные кристаллы и концентрированный рассол. Замерзание солёной воды сопровождается избирательным ростом ветвистых кристаллов льда, отторгающим в окружающую жидкость кристаллы соли, повышая её солёность. В итоге незамёрзший раствор солей высокой концентрации механически захватывается растущей ледяной массой. Дальнейшее её промерзание приводит к вымерзанию пресной воды из этих полостей и образованию скелетной структуры льда, содержащей капилляры и замкнутые ячейки с концентрированным рассолом. Повышение температуры льда сопровождается обратным процессом – таянием льда на границе с рассолом, ростом объёма жидкой фазы и образованием сквозных капилляров, через которые стекает рассол. В результате первые порции талого стока имеют высокую концентрацию солей. После выхода основной массы солей талый сток даёт пресную воду. Аналогичные процессы приводят к распреснению многолетних морских льдов, что издавна использовалось жителями Крайнего Севера для получения пресной воды. Так миграция рассола в ледяном покрове морей, обусловленная в основном температурным градиентом, приводит к его распреснению [2]. Минерализация рассола снижается от 10–15 г/л в начале образования ледяного покрова до 4–7 г/л весной. Одногодичный морской лёд имеет минерализацию менее 1 г/л. Этот процесс можно многократно ускорить, создавая ледяной массив с небольшой минерализацией и температурой.

В природных условиях метод вымораживания не требует больших капиталовложений и энергетических затрат, поскольку замораживание воды протекает под воздействием естественной отрицательной температуры воздуха, а таяние льда обусловлено положительной температурой воздуха и солнечной радиацией. Однако известные методы естественного вымораживания имели небольшую производительность намораживания льда и низкую эффективность опреснения [3]. Для устранения указанных недостатков потребовалось значительно повысить производительность намораживания льда, научиться создавать ледяные массивы с пористой структурой, легко фильтрующей воду, значительно снизить солёность намораживаемого льда. Предварительные экспериментальные исследования показали, что к одному из наиболее экономичных способов опреснения и очистки больших объёмов минерализованной воды относится метод капельного вымораживания, который реализуется при зимнем дождевании [4–6].

Для повышения производительности намораживания пористого льда плотностью 500–600 кг/м^3 применяется искусственный ледяной дождь, создаваемый дальнеструйными дождевальными установками. При замерзании капель солёной воды, падающих в воздухе с отрицательной температурой, на их поверхности образуется ледяная оболочка, а соли вытесняются в центральное, незамёрзшее ядро капли. Когда капля падает на землю, разрушается ледяная оболочка (при замерзании до 50–60% объёма капли), а незамёрзший рассол вытекает из капли и фильтруется за пределы массива пористого льда. Это значительно снижает минерализацию массива пористого льда ещё на стадии намораживания. Оставшийся рассол удаляется в процессе таяния льда.

Суточная производительность намораживания пористого льда из пресной воды серийной дождевальной установкой ДДН–70 составляет 75 м^3 воды в пересчёте на один градус средней суточной отрицательной температуры воздуха. При температуре воздуха –20 °С за сутки формируются массивы пористого льда объёмом поряд-

ка 3000 м^3 и высотой более 7 м. На территории России за холодный период производительность намораживания пористого льда из пресной воды при работе одной дождевальной установки изменяется от 20 до 500 тыс. т [4]. В настоящее время зимнее дождевание широко используется для строительства ледяных переправ и автозимников [7]. Зарубежный опыт создания искусственных ледяных островов показывает, что наилучший эффект даёт намораживание льда методом дождевания [8]. Этот метод имеет большое преимущество перед остальными в скорости создания больших масс намороженного льда и принят в качестве основного метода создания искусственных ледяных островов в Международном стандарте ISO 19906.

Эксперименты с водой небольшой минерализации (до 10 г/л) показали, что метод капельного вымораживания позволяет ещё на стадии намораживания снизить минерализацию массива пористого льда в 10–12 раз. При экспериментальных исследованиях на архипелаге Шпицберген установлено, что в случае использования морской воды минерализация незамёрзшей части капли растёт, понижается температура замерзания и, как следствие, снижаются производительность намораживания и выход пресной воды. Цель исследований – оценка эффективности применения зимнего дождевания для опреснения морской воды.

Производительность намораживания и солёность пористого льда

Солёность массива пористого льда зависит от солёности незамёрзшей воды в капельном факеле и влажности пористого льда в массиве. При неполном замерзании капли воды соли остаются в жидкой незамёрзшей её части. Чем больше льда в капле и солёность замораживаемой воды, тем выше солёность незамёрзшей воды, которая может представлять собой концентрированный рассол. Оценим минерализацию незамёрзшей воды в капле S_b, которая в значительной степени будет определять минерализацию массива пористого льда. При замерзании капли солёной воды происходит дендритный рост кристаллов льда, и в случае небольших размеров капли эти кристаллы будут захватывать весь её объём (при небольшой минерализации воды возможно формирование ледяной оболочки капли), поэтому для расчётов будем применять зависимости, полученные в работе [3] при моделировании объёмного промерзания капли солёной воды.

Расчёты будем выполнять для капельного факела, образованного при работе дождевальной установкой ДДН–70 при насадке диаметром 55 мм. Эта установка наиболее распространена в России. На её основе разработан дождеватель «Град–1» для работы в зимних условиях. Дальность полёта струи дождевателя ДДН–70 составляет 70 м при расходе воды 65 л/с и высоте капельного факела 15–20 м. Основная часть экспериментальных исследований выполнена на базе этого дождевателя. Средний диаметр капель для этой насадки, указанный в описании к дождевателю, – 1,5 мм. Наши измерения в зимних условиях дали такое же значение среднего радиуса капель воды. Скорость падения капли воды в воздухе v можно оценить по формуле $v = 6{,}42R^{0{,}63}$, где R – радиус капли воды, мм. Время падения капли воды радиусом 0,75 мм с высоты 18 м составляет 3,33 с при скорости падения капли 5,4 м/с.

При падении капли в капельном факеле происходит нагревание воздуха в результате теплообмена капли с воздухом и выделения теплоты льдообразования. Интенсивность тепловыделения зависит от перепада температуры между замёрзающей каплей воды и воздухом в факеле. С ростом замерзания капли и солёности исходной воды снижаются температура капли и интенсивность теплообмена. В результате нагревание воздуха в факеле уменьшается. Так, средняя за время падения температура капли при минерализации намораживаемой воды 5 г/л составит −0,29 и −0,41 °С при температуре атмосферного воздуха −10 и −40 °С соответственно и −2,03 и −2,74 °С при минерализации намораживаемой воды 35 г/л. Для оценки роста температуры воздуха в капельном факеле авторами работы [3] получена следующая зависимость:

$$\Delta T = (T_i - T_a)/(1 + 0{,}0121 v_1 R^{1{,}93} L G^{-1}), \qquad (1)$$

где T_i – температура капли, °С; T_a – температура атмосферного воздуха, °С; v_1 – скорость вентиляции факела ветром, м/с; R – радиус ка-

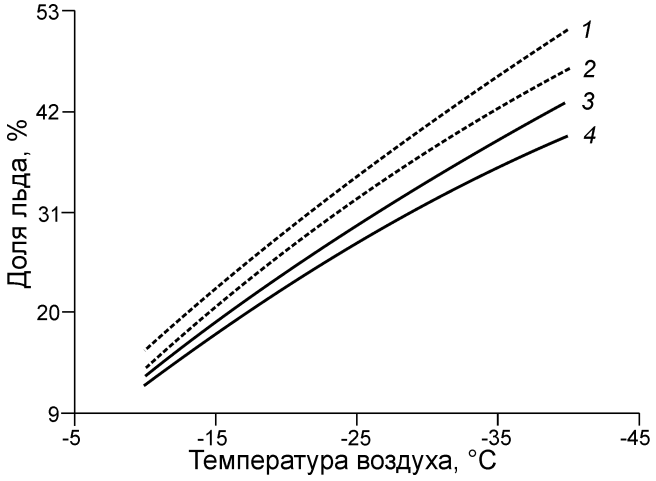

Рис. 1. Доля льда (%) в отдельной капле (*1*, *2*) и в капельном факеле (*3*, *4*) для воды минерализацией 5 г/л (*1*, *3*) и 35 г/л (*2*, *4*)

Fig. 1. The percentage of ice in a separate drop (*1*, *2*) and in a stream of drops (*3*, *4*) for water with a mineralization of 5 g/*l* (*1*, *3*) and 35 g/*l* (*2*, *4*)

пель, мм; L – длина факела, м; G – расход воды дождевальной установкой, м^3/с.

Скорость вентиляции v_1 капли диаметром d = 1,5 мм при скорости ветра 5 м/с составляет около 1,3 м/с. При $G/L = 18 \cdot 10^{-4}$ м^2/с по формуле (1) получим температуру воздуха в факеле для капель воды диаметром 1,5 мм и минерализацией 5 г/л −8,4 и −33,6 °С при температуре атмосферного воздуха −10 и −40 °С соответственно. При минерализации воды 35 г/л эти значения составят −8,7 и −33,9 °С. В результате капли воды падают в воздухе с температурой выше, чем температура атмосферного воздуха, и процент намораживаемого льда будет ниже. Расчёты показывают, что при температуре атмосферного воздуха −10 и −40 °С в отдельной капле воды минерализацией S_w = 5 г/л замерзает 16 и 51% объёма капли соответственно (рис. 1); в случае S_w = 35 г/л доля замерзания в отдельной капле воды будет меньше и составит 14 и 47%. При этом минерализацию незамёрзшей воды можно оценить по формуле $S_b = S_w/(1 - f_d)$, где f_d – доля незамёрзшей воды в капле. Минерализация незамёрзшей воды в капле S_b к концу падения повысится до 6,0 и 10,2 г/л при S_w = 5 г/л (рис. 2, *а*) и до 40,7 и 66,0 г/л при S_w = 35 г/л (см. рис. 2, *б*) и температуре атмосферного воздуха −10 и −40 °С соответственно.

При учёте роста температуры воздуха в капельном факеле доля льда несколько уменьшится. При температуре атмосферного воздуха −10 и −40 °С в капельном факеле замерзает 13 и 43% воды минерализацией S_w = 5 г/л соответственно и 12 и 39% при минерализации воды S_w = 35 г/л (см. рис. 1). При этом минерализация незамёрзшей воды в капле к концу её падения в капельном факеле повысится до 5,8 и 8,8 г/л при S_w = 5 г/л (см. рис. 2, *а*) и до 39,8 и 57,8 г/л при S_w = 35 г/л (см. рис. 2, *б*) и температуре атмосферного воздуха −10 и −40 °С соответственно. Для капель меньшего размера этот эффект будет ещё более значимым. Расход воды дождевальной установкой ДДН–70 с насадкой диаметром 55 мм составляет около 5600 м^3/сут. Поэтому, учитывая долю льда в капельном факеле из воды минерализацией 35 г/л, получим массу пористого льда равную 670 и 2190 т льда за сутки при температуре атмосферного воздуха −10 и −40 °С соответственно.

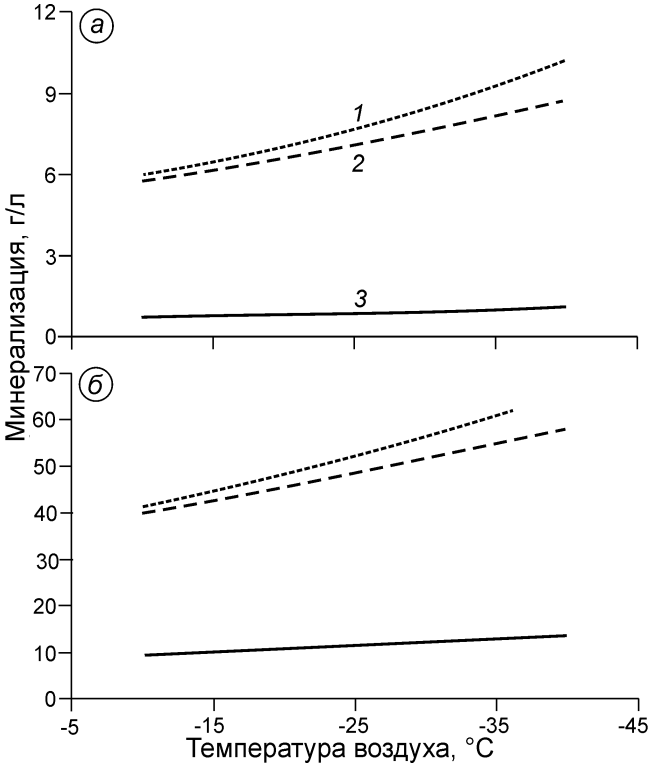

Рис. 2. Минерализация незамёрзшей воды в капле воды (*1*), в капельном факеле (*2*) и минерализация пористого льда (*3*) для воды минерализацией 5 г/л (*а*) и 35 г/л (*б*)

Fig. 2. The mineralization of unfrozen water in a drop of water (*1*), in a stream of drops (*2*) and mineralization of porous ice (*3*) for water with a mineralization of 5 g/*l* (*a*) and 35 g/*l* (*b*)

Экспериментальные исследования по опреснению пористого льда

Первые опыты по опреснению небольших образцов пористого льда, намороженного из минерализованной воды, дали положительные результаты [3]. Лёд получали разбрызгиванием раствора NaCl с минерализацией 30 г/л с высоты 42 м. Температура воздуха во время экспериментов изменялась от −10 до −15 °С. Доля льда в каплях диаметром 3–4 мм не превышала 14%. При медленном таянии (семь суток) 55% массы образца льда минерализация его верхнего слоя уменьшилась на два порядка.

Для изучения динамики опреснения пористого льда и оценки выхода пресной воды проведена серия лабораторных экспериментальных исследований. Это вызвано тем, что в полевых условиях не всегда можно исследовать динамику выхода различных микроэлементов, а также влияние параметров процесса таяния на опреснение. Поэтому в лабораторных условиях пористый лёд, образованный из осколков ледяных оболочек капель, заменялся мелкодроблёным льдом. Условия получения такого льда отличаются от пористого льда по скорости льдообразования и крупности ледяных кристаллов, однако закономерности фильтрации талой воды, которая перемещается по поверхности ледяных гранул, а также процесса солеобмена талой воды с плёнкой «рассола» сохраняются. При этом определённый интерес вызывают задачи очистки и значительного опреснения загрязнённых минерализованных вод в бытовых условиях.

Лёд получали замораживанием солёной воды слоями толщиной до 3 мм с последующим его дроблением и размещением в полиэтиленовые цилиндрические ёмкости. Последние изолировали с боковых сторон и снизу для снижения интенсивности таяния. Миграция рассола в солёном льду происходит как под действием силы тяжести по межкристаллическому пространству, так и в результате диффузии ячеек рассола под действием температурного градиента. В изотермических условиях ячейки рассола находятся в термодинамическом равновесии с окружающим льдом. При росте температуры льда это равновесие нарушается. Для его восстановления часть окружающего льда тает, понижается солёность рассола и увеличиваются размеры ячеек рассола. В дальнейшем это приводит к образованию сквозных капилляров, через которые начинает интенсивно мигрировать рассол. Экспериментальные исследования миграции рассола в солёном льду [2] показали, что основной способ удаления соли из свежего морского льда – гравитационный сток рассола по каналам между зёрнами льда. В небольшой степени распреснение льда обусловлено миграцией капель рассола.

При намораживании применялся раствор NaCl с минерализацией воды от 0,4 до 30 г/л и массой $M_в = 500 \div 900$ г. Высота образцов пористого льда не превышала 25 см. Его температура составляла $t_i = -4 \div -9$ °С. Начальная влажность пористого льда f_{i0} зависит от его температуры t_i и минерализации исходной воды S_w в соответствии с формулой

$$f_{i0} = S_w / S_{ib}, \qquad (2)$$

где S_w – минерализации исходной воды, кг/м^3; $S_{ib} = \sigma t_i$ – минерализация рассола в пористом льду, кг/м^3; $\sigma = -16{,}5$ кг/(м^3·°С) – коэффициент пропорциональности для раствора NaCl; t_i – температура пористого льда, °С.

Расчёты по формуле (2) показывают, что при минерализации исходной воды $S_w = 5$ г/л и температуре пористого льда от −1 до −10 °С доля незамёрзшей воды изменяется от 30 до 3%; при $S_w = 30$ г/л и изменении t_i от −3 до −10 °С влажность f_{i0} изменяется от 60 до 18%. Дробление тонких слоёв намороженного льда и формирование пористого льда позволяют ускорить сток рассола. В экспериментах с водопроводной водой с минерализацией 0,24 г/л последние порции талого стока имели минерализацию менее 0,001 г/л. Применение рассмотренной технологии получения пористого льда даёт возможность исследовать особенности опреснения минерализованных вод и может быть использовано для улучшения качества питьевой воды в бытовых условиях.

Теоретические исследования позволили установить динамику опреснения пористого льда [3]:

$$S_r = m_r^n, \qquad (3)$$

где $m_r = M_i / M_{i0}$ – относительная масса; $n = (1 - f_i)/f_i$; $S_r = S_i / S_{i0}$ – относительная минерализация; S_{i0}, M_{i0} – начальные значения минерализации и массы льда соответственно; S_i, M_i – текущие значения ми-

нерализации и массы льда в процессе таяния соответственно; f_i – влажность пористого льда, доли ед.

Расчёты по формуле (3) показывают влияние влажности пористого льда на эффективность его опреснения. При влажности пористого льда 12% и таянии 30% объёма минерализация оставшейся части массива в 4 раза меньше, чем при влажности 23%, а при таянии 50% объёма льда – в 16 раз. Производственные сточные воды, наряду с солями, содержат растворимые органические примеси и микроэлементы, поэтому ряд экспериментов был проведён с растворённой органикой и микроэлементами. Исследования по эффективности очистки воды от растворённой органики были проведены на образцах сточных вод целлюлозно-бумажного комбината с помощью аналога метода факельного вымораживания в лабораторных условиях [3]. Суммарное содержание органических веществ в порциях талого стока определяли по общему содержанию углерода. Намороженный лёд с содержанием углерода около 150 мг/л при нагревании до небольших отрицательных температур легко дробился в мелкую крошку и по структуре напоминал разрыхлённый лёд с солесодержанием свыше 15 г/л. Исходная вода имела сероватый оттенок, а первые порции талой воды были коричневого цвета. При стоке трети объёма пористого льда вытекающая талая вода становилась уже прозрачной и по цвету соответствовала водопроводной.

Эксперименты показали, что выход органики происходит приблизительно с такой же интенсивностью, как и ионов Na^+ или SO_4^{2-}. Их содержание в пористом льду уменьшается на порядок при таянии 1/3 части его объёма и в 20–60 раз – при таянии половины. Ряд экспериментов был проведён с Cr и Cu. Их содержание в талом стоке определялось атомно-абсорбционным методом. Установлено, что динамика выхода Cr и Cu с начальной концентрацией хрома 0,2 и 0,59 мг/л и меди 16 мг/л практически одинакова и описывается зависимостью (3) при $n = 4{,}3$. Отметим, что обычное вымораживание с получением монолитного льда не даёт такого результата. Эксперимент с намораживанием ледяного монолита с последующим его таянием показал значительные колебания содержания углерода и химических элементов в талой воде с небольшой тенденцией к их снижению в последних её порциях.

Наряду с лабораторными исследованиями, проведены полевые работы с применением морской, речной и озёрной воды, а также техногенных сточных вод. *Полевые экспериментальные исследования с морской водой* выполняли на базе Шпицбергенской экспедиции Института географии РАН при содействии сотрудников рудника Баренцбург [3]. Для намораживания использовали морскую воду из залива Грёнфьорд с минерализацией 34 г/л. Эффективность льдообразования в факеле высотой 10 м составляла 12%. Средний размер капель изменялся от 1 до 3 мм. После стока избытка воды и промерзания намороженный материал представлял собой непрозрачную пузырчатую массу, напоминавшую снежный лёд и состоящую из осколков ледяных оболочек капель размером 0,3–0,5 мм. Через 20 часов после окончания намораживания плотность льда составила 470–550 кг/м^3. Средняя минерализация массива понизилась до 6–10 г/л в течение одних суток, а затем постепенно до 3,3 и 0,4 г/л через четверо и девять суток соответственно.

Для исследования режима опреснения льда, намороженного из морской воды, отбирались образцы массой до 5 кг, толщиной 25–30 см и диаметром до 20 см. В помещении с температурой воздуха около 20 °C они подвергались естественному плавлению вплоть до полного растапливания. Этот процесс продолжался от нескольких часов до суток. При таянии загрязнённых образцов происходило не только их распреснение, но и очистка стекающей талой воды от нерастворимых примесей. Так, каменноугольная пыль накапливалась в поверхностном слое тающего льда, в результате чего талая вода, за исключением её последних порций, была прозрачной. При более медленном таянии – в течение суток – динамика опреснения соответствовала расчётам по формуле (3) при влажности тающего льда 23%.

В феврале–марте 1991 г. были *проведены полевые полупроизводственные эксперименты по опреснению пористого льда* со сбросными водами Балаковской АЭС, задача которых заключалась в разработке технологии применения метода капельного вымораживания для опреснения и очистки загрязнённых минерализованных вод, а также в исследовании динамики деминерализации намороженного пористого льда и выхода ионов различных солей. Для намораживания использовался один из бассейнов-накопителей сточных вод. Доля льда, образующегося в процессе дождевания в 12-метровом факеле с учётом тепло-

обмена на намораживаемой поверхности, составила около 12%. Незамёрзшая в процессе дождевания вода стекала по уклону обратно в бассейн. Минерализация исходной воды – 5,75 г/л, температура её замерзания около −0,3 °С. При дождевании на намораживаемой поверхности после быстрого стока незамёрзшей воды формировалась толща влажного пористого льда плотностью 400–600 кг/м^3, состоявшая из обломков ледяных оболочек капель и их конгломератов с небольшим содержанием рассола в виде плёночной влаги.

Общая минерализация исходной воды и талого стока определялась по электропроводности кондуктометром и контролировалась по сумме ионов. Результаты измерений химического состава исходной воды и образцов пористого льда показали, что минерализация пористого льда уменьшилась в 12 раз относительно минерализации намораживаемой воды. Для исследования динамики опреснения пористого льда при таянии использовался образец в виде колонки диаметром около 0,2 м, высотой 1,2 м и массой 17,4 кг, вырезанный из предварительно зачищенной вертикальной стенки промороженного ледяного массива. Колонка пористого льда была теплоизолирована с боков и снизу. Таяние происходило сверху. Таким образом имитировали процесс таяния ледяного массива в весенний период. Талая вода, образующаяся в верхнем слое пористого льда, фильтровалась через всю толщу образца и накапливалась в специальном поддоне. Через каждые 4–5 часов измеряли объём и общую минерализацию талого стока и отбирали пробы для детальных исследований в химической лаборатории Института географии РАН. Ионы Na^+, Cl^- и SO_4^{2-} вымывались интенсивнее, чем ионы Mg^{2+}, K^+ и Ca^{2+}. Наименьшая интенсивность выхода была у гидрокарбонатного иона, концентрация которого при таянии снизилась всего в 2 раза. Это объясняется разной подвижностью ионов солей [9]. Результаты измерений концентрации ионов солей в талом стоке послужили основой для оценки снижения их концентрации в массиве пористого льда при таянии 25 и 50% объёма массива (таблица). Экспериментальные значения концентрации ионов солей в пористом льду при таянии и результаты расчётов по формуле (3) при влажности пористого льда $f_i = 0{,}12$ показали хорошее соответствие.

Таблица. **Снижение концентрации ионов солей в пористом льду (в разы) при таянии относительно их концентрации в намораживаемой воде**

Ионы солей	Доля таяния льда, %	
	25	50
HCO_3^-	8	9
Cl^-	86	733
SO_4^{2-}	103	1302
Ca^{2+}	35	61
Mg^{2+}	48	75
Na^+	103	900
K^+	43	308
Сумма ионов	79	284

Результаты исследований и расчёты по формуле (3) показали, что к началу талого стока влажность пористого льда, намороженного из раствора NaCl с минерализацией 30 г/л, морской воды и из сточных вод АЭС, составляла 26, 23 и 12% соответственно. В последнем случае минерализация пористого льда к началу таяния была на порядок ниже, чем в первых двух случаях. Эксперименты показали, что методом зимнего дождевания из воды с минерализацией до 10 г/л можно получать массивы практически пресного пористого льда уже на стадии их формирования. Дальнейшая деминерализация происходит в процессе таяния такого массива. Близкие результаты получены и при намораживании пористого льда на оз. Сарпа в Волгоградской области [9].

Высокая эффективность опреснения методом зимнего дождевания получена и авторами работы [6], в которой представлены результаты масштабного эксперимента в Университете Альберты для оценки эффективности удаления растворённых химических веществ из шахтных сточных вод рудника Коломак. При зимнем дождевании замерзало примерно 30% шахтных сточных вод. Исследования показали, что после таяния 39% массива пористого льда произошло удаление растворённого химического вещества на 87–99% (в зависимости от химического состава). Концентрация мышьяка была снижена приблизительно в 4 раза, цианид удалялся на 99,2%. При этом вода, полученная после таяния оставшихся 61% массива пористого льда, требовала лишь незначительной дальнейшей обработки, что сильно снижало общие затраты на приведение её в норму [6].

Оценка эффективности опреснения пористого льда

Расчёты показали, что для капель воды диаметром 1, 1,5 и 2 мм и минерализацией 5 г/л, падающих с высоты 18 м при температуре атмосферного воздуха –20 °С, доля льда в капле составляет 58, 29 и 18% соответственно (рис. 3, *а*). При этом минерализация незамёрзшей в капле воды равна 12, 7 и 6 г/л соответственно. При минерализации намораживаемой воды 35 г/л для капель этих размеров доля льда в капле будет равен 52, 27 и 17% (см. рис. 3, *б*), а минерализация незамерзшей воды – 73, 48 и 42 г/л соответственно. Применение относительных (нормированных) значений величин позволяет сравнивать результаты разных экспериментов и в то же время легко рассчитать абсолютные значения этих величин. Данные о содержании ионов солей в пористом льду при таянии дают возможность оценить динамику их удаления в целях определения эффективности как опреснения, так и метода концентрирования различных веществ вымораживанием.

Установлено, что солёность намораживаемой воды влияет на структуру льда, которая при минерализации воды 35 г/л становится более рыхлой, с большей площадью поверхности кристаллов. Это влияет на влажность массива пористого льда как в изотермическом состоянии, так и при таянии. Со снижением интенсивности таяния влажность массива пористого льда может уменьшаться. При влажности массива f_i = 12 (*23*)% минерализация массива при стаивании 20 и 50% его массы уменьшится в соответствии с формулой (3) в 5 (*2*) и 161 (*10*) раз

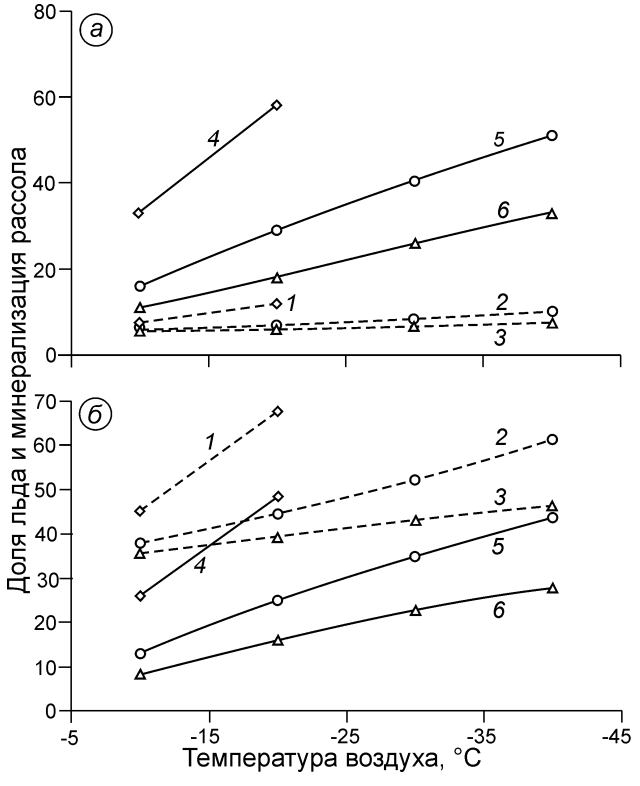

Рис. 3. Минерализация рассола *1–3* (г/л) и доля льда *4–6* (%), образующегося в капельном факеле из воды минерализацией 5 (*а*) и 35 (*б*) г/л для капель диаметром: 1,0 мм – *1*, *4*; 1,5 мм – *2*, *5*; 2,0 мм – *3*, *6*

Fig. 3. The mineralization of brine *1–3* (g/*l*) and the percentage of ice *4–6* (%) formed in a stream of drops from water with a mineralization of 5 (*a*) and 35 (*б*) g/*l* for droplets with a diameter of: 1.0 mm – *1*, *4*; 1.5 mm – *2*, *5*; 2.0 mm – *3*, *6*

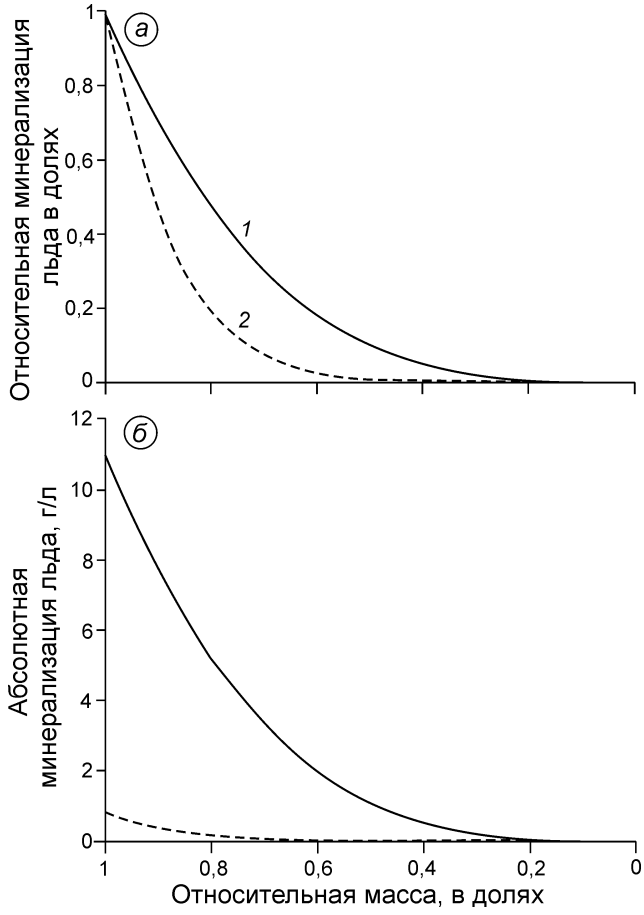

Рис. 4. Относительная (*а*) и абсолютная (*б*) минерализация пористого льда в зависимости от минерализации воды:
1 – 35 г/л; *2* – 5 г/л

Fig. 4. Relative (*a*) and absolute (*б*) mineralization of porous ice depending on the mineralization of water:
1 – 35 g/*l*; *2* – 5 g/*l*

соответственно (рис. 4, *а*). При этом в абсолютных единицах минерализация массива пористого льда, намороженного из воды с минерализацией 5 г/л, влажностью массива f_i = 12% и стаиванием 20 и 50% его массы, составит 0,165 и 0,005 г/л соответственно (см. рис. 4, *б*). При минерализации исходной воды 35 г/л, влажности массива f_i = 23% и стаивании 20 и 50% массива пористого льда его минерализация составит 5,211 и 1,080 г/л (см. рис. 4, *б*).

Расчеты при температуре атмосферного воздуха −20 °С показали, что при применении дождевальной установки ДДН-70 (при насадке диаметром 55 мм и среднем диаметре капель 1,5 мм) минерализация массива пористого льда, намороженного из морской воды, составит порядка 11 г/л (см. рис. 4, *б*). Это обусловлено высокой минерализацией рассола во льду, равной 48 г/л. При таянии половины объема пористого льда минерализация оставшейся части составит порядка 1 г/л (см. рис. 4, *б*). При более низких значениях температуры атмосферного воздуха следует применять насадки большего диаметра, чтобы не повышать эффективность льдообразования и минерализацию массива пористого льда.

Заключение

Капельное вымораживание при зимнем дождевании – эффективный метод опреснения минерализованных вод. Экспериментальные и теоретические исследования показали высокую производительность намораживания пористого льда из воды разной солёности. Доля льда в капельном факеле меньше, чем в отдельной капле воды из-за нагревания капельного факела в результате теплообмена падающих капель воды с атмосферным воздухом. При температуре атмосферного воздуха −10 и −40 °С температура воздуха в капельном факел из капель воды диаметром 1,5 мм и минерализацией 5 г/л нагревается на 1,6 и 6,4 °С соответственно. При температуре атмосферного воздуха −10 и −40 °С доля льда в отдельной капле воды минерализацией 35 г/л составляет 14 и 47%, тогда как в капельном факеле эта доля будет меньше – 12 и 39% соответственно. При этом минерализация незамёрзшей воды в капельном факеле повысится до 40 и 58 г/л. При применении дождевальной установкой ДДН–70 получим массу пористого льда из воды минерализацией 35 г/л, равную 670 и 2190 т льда за сутки, при температуре атмосферного воздуха −10 и −40 °С соответственно.

При росте доли льда в капельном факеле увеличивается минерализация незамёрзшей воды, что ведёт к росту солёности пористого льда. Эксперименты показали, что при небольшой минерализации исходной воды – до 10 г/л – влажность пористого льда после стока избытка воды составляет порядка 12%, тогда как для пористого льда, намороженного из морской воды, эта величина намного выше – 23%. Из теоретических и экспериментальных исследований стало ясно, что влажность солёного пористого льда значительно влияет на эффективность опреснения. При влажности пористого льда 12% и таянии 30% объёма минерализация оставшейся части массива в 4 раза меньше, чем при влажности 23%, а при таянии 50% объёма льда – в 16 раз. При этом минерализация массива пористого льда, намороженного из воды с минерализацией 35 г/л при влажности массива 23%, составит 5 и 1 г/л при стаивании 20 и 50% его массы соответственно. Результаты исследований показывают, что с ростом минерализации намораживаемой воды снижается как доля льда в капле воды (производительность намораживания), так и эффективность опреснения. Однако даже при экспериментах с морской водой с минерализацией 35 г/л после стаивания более 50% объёма пористого льда минерализация оставшейся части составит около 1 г/л, и после соответствующей санитарно-гигиенической обработки эту воду можно использовать для питьевого водоснабжения. Причём такая вода будет содержать в достаточном количестве необходимые микроэлементы.

Благодарности. Математическое моделирование и анализ архивных материалов проводились в рамках темы Государственного задания № 0148-2019-0004. Расчёты, обработка и анализ экспериментальных данных выполнялись при поддержке программы президиума РАН № 22 «Перспективные физико-химические технологии специального назначения». Экспедиционные исследования на архипелаге Шпицберген вели при финансовой поддержке госзадания и логистической помощи Российского научного центра на Шпицбергене (РНЦШ).

Acknowledgments. The mathematical modeling and analysis of experimental data carried out according to the framework of fundamental scientific studies within the

project reg. № 0148-2019-0004. Calculations, processing and analysis of experimental data were carried out with the support of the program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences № 22 «Advanced Physico–Chemical Technologies for Special Purpose». Field studies on Svalbard were conducted with financial support from the state assignment and logistical assistance of the Russian Scientific Center on Spitsbergen (RSCS).

Литература

1. *Гомозов Э.В., Медведев А.А., Тришкин В.В.* Проблемы водоснабжения военнослужащих арктической группировки войск // Науч. вестн. ВВИМО. 2016. № 2 (38). С. 88–91.
2. *Kingery W.D., Goodnow W.H.* Brine migration in salt Ice // Ice and Snow: Properties, Processes, and Applications / Ed.: W.D. Kingery. M.I.T. Press: Cambridge, 1963. P. 237–247.
3. *Сосновский А.В.* Закономерности формирования и использования искусственных фирново-ледяных массивов: Дис. на соиск. уч. степ. д-ра геогр. наук. М.: Ин-т географии РАН, 2010. 301 с.
4. *Сосновский А.В., Ходаков В.Г.* Искусственное льдообразование в природных условиях для решения экологических проблем // МГИ. 1995. Вып. 79. С. 3–6.
5. *Gao W., Smith D.W., Sego D.C.* Release of contaminants from melting spray ice of industrial wastewaters // Journ. of Cold Regions Engineering. 2004. № 18. P. 35–51.
6. *Kevin W. Biggar, Robert Donahue, Dave Sego, Mathieu Johnson, Sean Birch.* Spray freezing decontamination of tailings water at the Colomac Mine // Cold Regions Science and Technology. 2005. № 42. P. 106–119.
7. Проектирование, строительство и содержание зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и Северо-Востока СССР. ВСН 137–89. М.: Минтрансстрой СССР, 1991. 177 с.
8. *Кубышкин Н.В., Бузин И.В., Головин Н.В., Гудошников Ю.П., Замарин Г.А., Скутин А.А.* Ледотехнические аспекты создания объектов транспортной инфраструктуры и разведочного бурения в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 4. С. 407–426. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-407-426.
9. *Сосновский А.В., Конторович И.И.* К расчёту опреснения минерализованного пористого льда при таянии // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 545–554. doi: org/10.15356/2076-6734-2016-4-545-554.

References

1. *Gomozov E.V., Medvedev A.A., Trishkin V.V.* Problems of water supply for the military of the Arctic grouping. *Nauchnyi vestnik VVIMO.* Scientific Bulletin of VVIMO. 2016, 2 (38): 88–91. [In Russian].
2. *Kingery W.D., Goodnow W.H.* Brine migration in salt Ice. Ice and Snow: Properties, Processes, and Applications. Ed.: W.D. Kingery. M.I.T. Press: Cambridge, 1963: 237–247.
3. *Sosnovsky A.V. Zakonomernosti formirovaniya i ispol'zovaniya iskusstvennykh firnovo-ledyanykh massivov.* Regularities of formation and use of artificial firn-ice massifs. PhD. Moscow: Institute of Geography RAS, 2010: 301 p. [In Russian].
4. *Sosnovskiy A.V., Khodakov V.G.* Artificial ice formation in natural conditions for handling environmental problems. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1995, 79: 3–6. [In Russian].
5. *Gao W., Smith D.W., Sego D.C.* Release of contaminants from melting spray ice of industrial wastewaters. Journ. of Cold Regions Engineering. 2004, 18: 35–51.
6. *Kevin W. Biggar*, *Robert Donahue*, *Dave Sego*, *Mathieu Johnson*, *Sean Birch*. Spray freezing decontamination of tailings water at the Colomac Mine. Cold Regions Science and Technology. 2005, 42: 106–119.
7. *Proektirovanie*, *stroitel'stvo i soderzhanie zimnikh avtomobil'nykh dorog v usloviyakh Sibiri i Severo-Vostoka SSSR. VSN 137–89.* Design, Construction, and Maintenance of Winter Motor Roads under Conditions of Siberia and the North-East of the USSR. VSN (All–Russia Construction Rules) 137–89. Moscow: Mintransstroy SSSR, 1991: 177 p. [In Russian].
8. *Kubyshkin N.V., Buzin I.V., Golovin N.V., Gudoshnikov YU.P., Zamarin G.A., Skutin A.A.* Aspects of ice engineering for the aims of construction of the transport infrastructure and reconnaissance drilling in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Problems of Arctic and Antarctic. 2018, 64 (4): 407–426. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-407-426
9. *Sosnovsky A.V., Kontorovich I.I.* The calculation of desalination of mineralized porous ice at thawing. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2016, 56 (4): 545–554. [In Russian]. doi: org/10.15356/2076-6734-2016-4-545-554.

Подписано в печать 05.08.2020 г. Дата выхода в свет 17.08.2020 г. Формат $60 \times 88^{1}/_{8}$. Цифровая печать.
Усл.печ.л. 19.0. Уч.-изд.л. 19.0. Бум.л. 10.0. Тираж 63 экз. Договорная цена. Заказ 3320.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-76744 от 24 сентября 2019 г.,
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Учредители: Российская академия наук, Институт географии Российской академии наук, Русское географическое общество.

Оригинал-макет подготовлен в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт географии Российской академии наук.
Издатель: Российская академия наук, 119991 Москва, Ленинский просп., 14.
Исполнитель по госконтракту № 4У-ЭА-197-18
ООО «ИКЦ «АКАДЕМКНИГА», 117342 Москва, ул. Бутлерова, д. 17Б, а/я 47.
16+ Отпечатано в типографии «Book Jet» (ИП Коняхин А.В.), 390005, г. Рязань, ул. Пушкина, 18, тел. (4912) 466-151.