

Прикладные проблемы

УДК 628.165:551.322

doi:10.15356/2076-6734-2016-4-545-554

К расчёту опреснения минерализованного пористого льда при таянии

© 2016 г. А.В. Сосновский¹, И.И. Конторович²¹Институт географии РАН, Москва, Россия;²ВНИИ гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Волгоград, Россия¹alexandr_sosnovskiy@mail.ru

The calculation of desalination of mineralized porous ice at thawing

A.V. Sosnovsky¹, I.I. Kontorovich²¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;²All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova, Volgograd, Russia¹alexandr_sosnovskiy@mail.ru

Received March 4, 2016

Accepted September 5, 2016

Keywords: *desalination, diffusion coefficient, mineralized water, porous ice.*

Summary

The results obtained in this work demonstrate that dynamics of desalination of porous ice depends on a mobility of ions of salts, and the mobility is determined by the diffusion coefficient. The ice was made by freezing of mineralized water of different chemical composition. Model calculations of average mineralization of the porous ice at its thawing were made, and the ion concentrations of different salts were defined. Values of the diffusion coefficients of the salt ions in the film of brine ice pellets were obtained by means of comparison of results of measurements and calculations of dynamics of content of the salt ions in a porous ice at its thawing. The diffusion coefficient of ions Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} is by order of magnitude larger than that of Ca^{2+} and by two orders of magnitude than HCO_3^- . This results in that the content of ions Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} decreases in porous ice at its thawing 3 times faster than the content of the ions Ca^{2+} . Basing on analysis of chemical composition of drainage water in some regions in Russia a possibility to desalinate the porous ice formed during the winter sprinkling is demonstrated.

Поступила 4 марта 2016 г.

Принята к печати 5 сентября 2016 г.

Ключевые слова: *коэффициент диффузии, минерализованная вода, опреснение, пористый лёд.*

Рассмотрена динамика опреснения пористого льда, намороженного из минерализованной воды разного химического состава. Выполнены модельные расчёты минерализации пористого льда при таянии и концентрации в нём ионов различных солей. Путём сравнения измеренной динамики содержания ионов солей в пористом льду при таянии и расчётов определены коэффициенты диффузии ионов солей в плёнке «рассола» ледяных гранул. На основе анализа химического состава дренажных вод в некоторых районах России показана возможность применения опреснения пористого льда, образованного при зимнем дождевании.

Введение

Рациональное использование водных ресурсов и защита их от загрязнения относятся к категории основных проблем устойчивого развития территорий. В декабре 2003 г. Генеральная ассамблея ООН объявила 2005–2015 гг. Международным десятилетием действий «Вода для жизни». Потребность в воде постоянно растёт. Это обусловлено ростом населения, изменениями в потреблении продовольствия, необходимостью обеспечения растущих потребностей в

энергии. Потребление пресной воды за последние полвека увеличилось втрое. Растущий дефицит пресной воды и ухудшение её качества в результате техногенного загрязнения приводят к экономическим и социальным проблемам. Один из путей решения проблемы дефицита пресной воды и защиты природных вод от загрязнения — её опреснение. Однако промышленные способы опреснения требуют больших капитальных и энергетических затрат. Как правило, они применяются для питьевого водоснабжения. Известные в настоящее время способы очистки и

опреснения природных и техногенных вод неэффективны для деминерализации и очистки больших объёмов промышленных, сельскохозяйственных и бытовых сточных вод ввиду высокой себестоимости опреснённой воды, больших капитальных и энергетических затрат, необходимости предварительной очистки воды от нерастворимых примесей.

Способы опреснения, основанные на использовании возобновляемых видов природной энергии, в частности солнечной радиации и ветра, имеют небольшую производительность из-за рассредоточенности такой энергии в пространстве и трудностей её концентрации [1, 2]. Проблема концентрации энергии возникала и в случае использования природного холода для опреснения солёных вод [3]. Однако с разработкой высокопроизводительного метода зимнего дождевания для ускоренного создания многометровых массивов пористого льда появилась возможность эффективного использования запасов холода приземного слоя атмосферы.

Зимнее дождевание реализует процесс факельного льдообразования, при котором основной теплообмен переносится с плоскости намораживания в капельный факел. В результате капли воды частично замерзают в воздухе и при падении на землю формируют массив пористого льда. В результате процессов метаморфизма пористый лёд преобразуется в материал, по структуре соответствующий естественному фирну ледников и поэтому названный искусственным фирном по аналогии с искусственным снегом, который производится при работе снежных пушек. В случае управления процессом факельного льдообразования возможно формирование монолитного льда.

В настоящее время метод зимнего дождевания, включённый в нормативные документы (ВСН 137–89), широко используется для намораживания ледовых переправ. В работе [4] рассмотрены особенности применения зимнего дождевания для опреснения солёных вод. Опреснение минерализованной воды способом зимнего дождевания основано на использовании энергии природного холода и эффекта разделения замерзающей минерализованной воды на пресные кристаллы и «рассол». Первые лабораторные эксперименты позволили установить эффективность применения пористого

льда для очистки и опреснения минерализованных вод [5]. Дальнейшие полупроизводственные эксперименты [6, 7] показали, что ещё на стадии формирования массива пористого льда его минерализация на порядок меньше исходной минерализованной воды. Остаток солей вымывается при таянии. При этом динамика выхода разных солей при таянии пористого льда значительно отличается, поэтому для расчёта опреснения вод различного минерального состава следует рассчитывать динамику выхода разных солей. Цель работы — определить параметры солеобмена при таянии пористого льда для оценки динамики опреснения массивов пористого льда разного химического состава.

Экспериментальные исследования по опреснению пористого льда

Для установления закономерностей процесса опреснения пористого льда, проверки теоретических положений, оценки влияния различных факторов на интенсивность опреснения были проведены лабораторные и полевые экспериментальные исследования. Лабораторные эксперименты дополнялись полевыми с применением дождевальной техники, в ходе которых сложно учесть всё разнообразие условий опреснения пористого льда, среди которых — очистка и опреснение от растворённой органики и микроэлементов, учёт разной интенсивности таяния и т.п. В лабораторных условиях применение мелкодроблёного льда как аналога пористого позволило уменьшить минерализацию воды в 10–100 раз [8]. В экспериментах с водопроводной водой с минерализацией 0,24 г/л последние порции талого стока имели минерализацию менее 0,001 г/л. Хотя мелкодроблёный лёд отличается от искусственного фирна, но закономерности фильтрации талой воды, которая перемещается по поверхности ледяных гранул, и процесс солеобмена талой воды с плёнкой рассола сохраняются.

В целях отработки технологии применения метода факельного намораживания для опреснения и очистки загрязнённых минерализованных вод в феврале–марте 1991 г. были проведены экспериментальные исследования со сбросными водами Балаковской АЭС. Одна из целей экспериментов — исследование динами-

Таблица 1. Химический состав замораживаемой воды и образцов пористого льда, мг/л

Ионы	Вода*	Намороженный пористый лёд
HCO_3^-	114,0/8; 9	21,2
Cl^-	397,6/86; 733	34,3
SO_4^{2-}	3379,0/103; 1302	255,6
Ca^{2+}	204,0/35; 61	20,3
Mg^{2+}	47,4/48; 75	5,4
Na^+	1580,0/103; 900	121,4
K^+	26,9/43; 308	2,7
Сумма ионов	5749,2/79; 284	460,9

*В числителе — содержание ионов в замораживаемой воде; в знаменателе — уменьшение концентрации ионов солей в пористом льду (в разы) относительно их концентрации в замораживаемой воде при таянии 24 и 50% объёма пористого льда соответственно.

ки деминерализации намороженного пористого льда и выхода ионов различных солей. Намораживание проводилось дождевальной установкой «Град-1». Минерализация исходной воды составляла 5,75 г/л, а температура её замерзания была $-0,3^\circ\text{C}$. Общая минерализация исходной воды и талого стока определялась по электропроводности с помощью кондуктометра и контролировалась по сумме ионов. Результаты измерений химического состава исходной воды и образцов пористого льда [6] даны в табл. 1. Из приведённых в ней данных видно, что суммарная минерализация пористого льда, намороженного факельным методом в указанных ранее условиях, в среднем на порядок меньше, чем исходной воды. Примерно в такой же пропорции уменьшилось и содержание анализируемых ионов. Исключение — гидрокарбонатный ион, относительная концентрация которого в пористом льду приблизительно в 5 раз меньше, чем в исходной воде. Зависимость относительной концентрации ионов солей в пористом льду при таянии от его относительной массы показана на рис. 1. Для ионов Cl^- , SO_4^{2-} и Na^+ экспериментальные значения их относительной концентрации практически совпадают. Близкие результаты получены в работе [9] при зимнем дождевании и формировании массива пористого льда на берегу оз. Сарпа Светлоярского района Волгоградской области.

Экспериментальные значения относительной концентрации ионов солей при таянии до 30% объёма пористого льда снижаются в

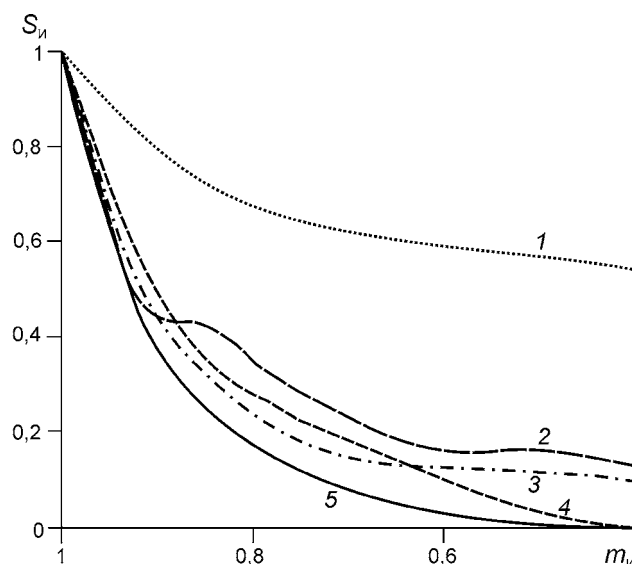


Рис. 1. Зависимость относительной концентрации ионов солей $S_{\text{и}}$ пористого льда от его относительной массы при таянии $m_{\text{и}}$:

1 — HCO_3^- ; 2 — Ca^{2+} ; 3 — Mg^{2+} ; 4 — K^+ ; 5 — Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+

Fig. 1. Dependence of the relative concentration of salt ions $S_{\text{и}}$ and of porous ice to its relative weight under thawing $m_{\text{и}}$:

1 — HCO_3^- ; 2 — Ca^{2+} ; 3 — Mg^{2+} ; 4 — K^+ ; 5 — Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+

5–10 раз (за исключением иона HCO_3^-). Результаты измерений показали, что динамика обессоливания пористого льда по отдельным ионам может значительно различаться. Так, ионы Na^+ , Cl^- и SO_4^{2-} вымываются интенсивнее ионов Mg^{2+} , K^+ и Ca^{2+} . Наименьшая интенсивность выхода у гидрокарбонатного иона, концентрация которого в пористом льду при таянии снижается всего в 2 раза. Последнее обстоятельство объясняется спецификой поведения иона HCO_3^- . Он вымывается из пористого льда значительно медленнее по сравнению с другими ионами. Так, в первой порции талой воды концентрация гидрокарбонатного иона в 2,7 раза выше, чем в исходном пористом льду, тогда как содержание других ионов больше примерно в 7 раз.

Анализ химического состава проб показал, что интенсивность вымывания ионов с талым стоком имеет следующую закономерность. Наибольшую интенсивность вымывания имеют ионы SO_4^{2-} , Cl^- и Na^+ , а наименьшую (за исключением HCO_3^-) — Ca^{2+} . Аналогичная закономерность без анализа гидрокарбонатного иона отмечена для ультрапресных вод, образующихся при таянии снежного покрова на полярных

ледниках [10]. Она соответствует геохимической классификации элементов по особенностям их водной миграции [11]. Подвижность ионов определяется значением коэффициента диффузии. В процессе стока химический состав первых порций талой воды меняется в сторону повышения относительных концентраций более подвижных ионов. После выхода преобладающего количества этих ионов наблюдается обратная картина — начинают доминировать менее подвижные ионы.

В табл. 1 показано уменьшение концентрации ионов солей в пористом льду (относительно их концентрации в намораживаемой воде) при таянии 24 и 50% начального объёма пористого льда. Так, при таянии 24% объёма пористого льда содержание ионов солей SO_4^{2-} и Na^+ уменьшается в 103 раза относительно их содержания в намораживаемой минерализованной воде, тогда как для иона HCO_3^- концентрация уменьшается только в 8 раз. Из табл. 1 видно, что при таянии от 24 до 50% объёма пористого льда концентрация иона HCO_3^- уменьшается во льду в 8–9 раз, тогда как для ионов SO_4^{2-} , Cl^- и Na^+ концентрация солей снижается от 86–103 до 733–1302 раза.

Расчёт опреснения пористого льда

В работе [4] для расчёта деминерализации небольших образцов пористого льда получена формула снижения относительной минерализации массива пористого льда в процессе таяния в зависимости от его относительного объёма. Для расчёта динамики опреснения небольших образцов пористого льда при таянии выполнено математическое моделирование [12]. При этом предполагалось, что плёночный «рассол» разбавляется талой водой и за счёт этого снижается минерализация массива при таянии. В результате была получена формула для расчёта относительной минерализации небольших образцов пористого льда при таянии в зависимости от его относительной массы:

$$S_r = m_r^{(1-f)/f}, \quad (1)$$

где S_r — отношение текущей минерализации массива пористого льда к начальной минерализации; m_r — отношение текущего объёма массива

пористого льда к его начальному объёму; f — влажность пористого льда при таянии.

Сравнение результатов расчётов по этой формуле с экспериментальными данными, выполненное в работах [5, 6], показало, что формула (1) хорошо описывает динамику процесса деминерализации небольших образцов пористого льда. При расчётах по этой формуле учитывается только влажность массива пористого льда при таянии. Однако отсутствие в ней характеристик процесса таяния, структуры льда и параметров ледяного массива затрудняет её применение для оценки выхода пресной воды в различных природно-климатических условиях.

Для учёта других параметров рассмотрена модель с фильтрацией талой воды, массообменом между солёным рассолом, заключённым в водной плёнке и в шейках контакта на границе ледяных гранул и талой водой [12]. При таянии ледяного массива происходят солеобмен между фильтрующейся талой водой и связанным плёночным «рассолом», покрывающим ледяные гранулы, а также перераспределение минерализации массива пористого льда по высоте и его деминерализация. Для расчёта этого процесса и оценки влияния различных параметров на деминерализацию пористого льда при таянии разработана математическая модель и выполнено численное моделирование процесса при следующих предположениях: массив пористого льда состоит из сферических ледяных гранул одинакового размера; связанный рассол находится в виде плёночной влаги; в ходе таяния размер капель в массиве не меняется; таяние массива происходит с поверхности; влажность пористого льда принимается постоянной; задача предполагается изотермической; лёд и рассол находятся в состоянии термодинамического равновесия [12].

Исследования, проведённые Де-Кервеном [13], показали, что в снегу с размером зёрен 2 мм большая часть потока талой воды проходит через водную плёнку, которой покрыты ледяные зёрна. Поэтому предполагалось, что вся талая вода перемещается по поверхности ледяных гранул с плёнкой рассола, что реализуется при небольшой интенсивности таяния и, как правило, в начальный его период, наиболее важный для эффективного распреснения ледяного массива.

В результате решения уравнения массообмена плёнки рассола с фильтрующейся водой, опи-

сывающего изменение количества солей в плёнке в связи с их диффузией в фильтрующую воду, получена зависимость для расчёта минерализации плёнки рассола S_p :

$$S_p = S_w + (S_{p0} - S_w) \exp(-C_1 \tau), \quad (2)$$

где S_w – минерализация фильтрующей воды; S_{p0} – начальная солёность рассола; τ – время; $C_1 = 3(1 + C_f \rho_p / \rho_r)^{2/3} D_c K_p / (C_f \rho_p R_l)$; D_c – коэффициент солеотдачи; $C_f = (1 - f)/f$; f – влажность пористого льда; R_l – радиус ледяной гранулы; ρ_p – плотность рассола; ρ_r – плотность льда; $K_p \approx 0,68$ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения минерализации по толщине плёнки рассола и изменение площади плёнки рассола, обусловленный существованием шейки контакта рассола с соседними ледяными гранулами.

Коэффициент солеотдачи D_c рассчитывается по следующей формуле [14]:

$$D_c = Sh \cdot D_d / (2R_p),$$

где Sh – число Шервуда, равно $2 + 0,6Sc^{1/3} \cdot Re^{1/2}$; Sc – число Шмидта, равно $\nu_{вд} / D_d$; Re – число Рейнольдса, равно $\nu 2R_p / \nu_{вд}$; ν – скорость движения талой воды, зависящая от её расхода; $\nu_{вд}$ – кинематическая вязкость воды; D_d – коэффициент диффузии соли; R_p – радиус ледяной гранулы с плёнкой рассола.

Зависимость (2) использована при численном моделировании солеобмена при таянии массива пористого льда с его поверхности. Методика расчёта такова. Толща пористого льда разбивается по глубине на равные слои толщиной Δh_l . Талая вода поступает с поверхности при стаивании очередного слоя льда. Время взаимодействия каждого слоя льда с талой фильтрующей водой τ определяется по формуле $\tau = \Delta h_l / \nu$. В каждом ледяном слое рассчитывается массообмен плёнки рассола с фильтрующей водой по формуле (2) и определяются минерализация плёнки рассола –

$$S_n^j \approx w_{n-1}^j + (S_n^{j-1} - w_{n-1}^j) \exp(-C_1 \tau) \quad (3)$$

и фильтрующей воды –

$$w_n^j = w_{n-1}^j + (S_n^{j-1} - S_n^j) f \Delta h_l / \Delta h_{вд}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) приняты следующие обозначения: $\Delta h_{вд}$ – толщина слоя талой воды; индексы j и n относятся к моменту времени и

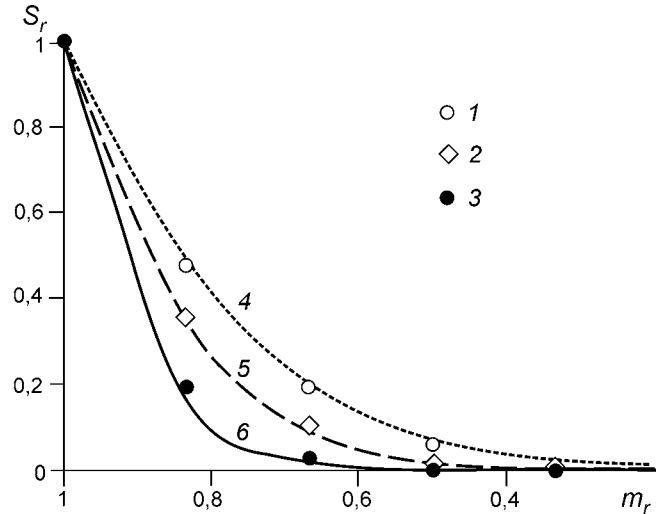


Рис. 2. Зависимость относительной минерализации пористого льда толщиной 30 см при таянии S_r от его относительной массы m_r по данным расчётов:

1–3 – по формуле (1); 4–6 – расчёты по формуле (2) при $D_d = 0,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ и влажности пористого льда: 1, 4 – 20%; 2, 5 – 15%; 3, 6 – 10%

Fig. 2. Relative mineralization of porous ice of 30 cm thickness under melting S_r in comparison with its relative weight m_r according to calculations:

1–3 – by the formula (1); 4–6 – calculations on the formula (2) at $D_d = 0,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ at humidity porous ice: 1, 4 – 20%; 2, 5 – 15%; 3, 6 – 10%

номеру ледяного слоя соответственно; w_{n-1}^j – минерализация талой воды, прошедшей через $n - 1$ -й ледяной слой, считая от дневной поверхности ледяного массива. Через каждый момент времени происходит стаивание очередного ледяного слоя, и на момент времени j слой стаивания в водном эквиваленте составляет $j \Delta h_{вд}$. В результате на каждый момент времени получаем изменение толщины ледяного массива и распределение минерализации по его глубине. Расчёты для образцов пористого льда толщиной 30 см, радиусом ледяной гранулы 0,75 мм при средней суточной температуре воздуха 5°C по формуле (1) и математической модели – формула (2) – показали хорошее совпадение при разной влажности пористого льда и коэффициенте диффузии соли NaCl $D_d = 0,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ (рис. 2). Разной солёности пористого льда соответствует разная его влажность при таянии [8]. Влажность пористого льда при таянии зависит от его солёности.

Для оценки применимости формулы (1) при расчётах опреснения больших образцов пористого льда использованы результаты исследований

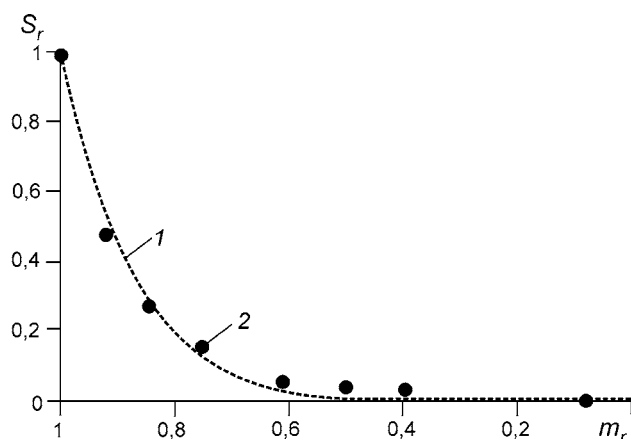


Рис. 3. Зависимость относительной минерализации S_r пористого льда, намороженного из сбросных вод АЭС с минерализацией 5,75 г/л, от его относительной массы m_r :

1 – расчёты по формуле (1) при влажности $f = 0,12$; 2 – экспериментальные значения

Fig. 3. Relative mineralization S_r of porous ice, frozen from wastewater of the NPP with a mineralization of 5.75 g/l, from its relative weight m_r :

1 – calculations by the formula (1) with a moisture content $f = 0,12$; 2 – the experimental values

по опреснению минерализованной воды шламотвалов Балаковской АЭС [6]. При начальной минерализации воды 5,75 г/л минерализация массива пористого льда составила 0,46 г/л (см. табл. 1). Минеральный состав воды представлен ионами разных солей. Для исследования динамики выхода солей из массива был взят образец массива толщиной 1,2 м. Сравнение расчётов по формуле (1) с данными экспериментальных исследований больших образцов пористого льда показало (рис. 3), что снижение средней минерализации массива хорошо описывается формулой (1), хотя динамика выхода разных солей при таянии массива различна. Это обусловлено преобладанием определённых солей в минерализованной воде.

Тренд экспериментальных значений относительной средней минерализации пористого льда от его массы (см. рис. 3) при таянии задаётся зависимостью $S_r = 0,9075m_r^{6,507}$, коэффициент корреляции $R^2 = 0,9821$, тогда как по формуле (1) эта зависимость имеет следующий вид: $S_r = m_r^{7,333}$. Таким образом, расчёты по формуле (1) для пористого льда показывают хорошее совпадение с данными экспериментов. Вместе с тем расчёты по модели – формула (2) – показывают значительное отличие от данных экс-

периментов для образцов льда толщиной более 30 см. При увеличении толщины пористого льда расчёты по модели дают значительный рост эффективности опреснения. Например, при увеличении толщины пористого льда с 0,2 до 1,0 м ($f = 0,25$, $R_{\text{л}} = 0,75$ мм) относительная минерализация пористого льда при расчётах по модели уменьшается в 3 раза. Такая высокая эффективность опреснения не соответствует данным экспериментов [6], которые хорошо описываются формулой (1) при толщине пористого льда 1,2 м. Одной из причин расхождения модельных расчётов с данными экспериментов может быть формирование каналов стока, по которым происходит фильтрация части талой воды. Известно, что в период активного таяния возможны образование каналов фильтрации в снежном покрове и спуск по ним талой воды [13]. Этот эффект отмечается в работах [15, 16].

Формирование каналов фильтрации и спуск по ним талой воды приводят к снижению доли талой воды, участвующей в солеобмене с плёнкой рассола. В результате вымывание остаточного рассола из массива пористого льда резко замедляется. Для оценки этого эффекта в работе [8] приведена методика учёта доли талой воды, участвующей в солеобмене. С ростом объёма таяния в солеобмене участвует всё меньшая часть талой воды. Для массива пористого льда толщиной 1,2 м при таянии 1/3 части объёма массива среднее значение доли талого стока, участвующего в солеобмене, составит около 60%, а при таянии всего массива в солеобмене участвует 1/3 часть талого стока. При учёте этого факта результаты расчётов по модели, как и по формуле (1), практически совпадают с данными экспериментов.

Таким образом, расчёты по формуле (1) для пористого льда данного минерального состава хорошо совпадают с данными экспериментов. Однако для минерализованных вод другого состава результаты расчётов по этой формуле могут отличаться от данных измерений. Это вызвано разной подвижностью ионов солей и соответственно разным коэффициентом диффузии. Результаты расчётов по модели – формула (2) – динамики выхода ионов солей из массива пористого льда при таянии для разных значений коэффициента диффузии и влажности пористого льда $f = 0,12$ приведены на рис. 4. Видно, что

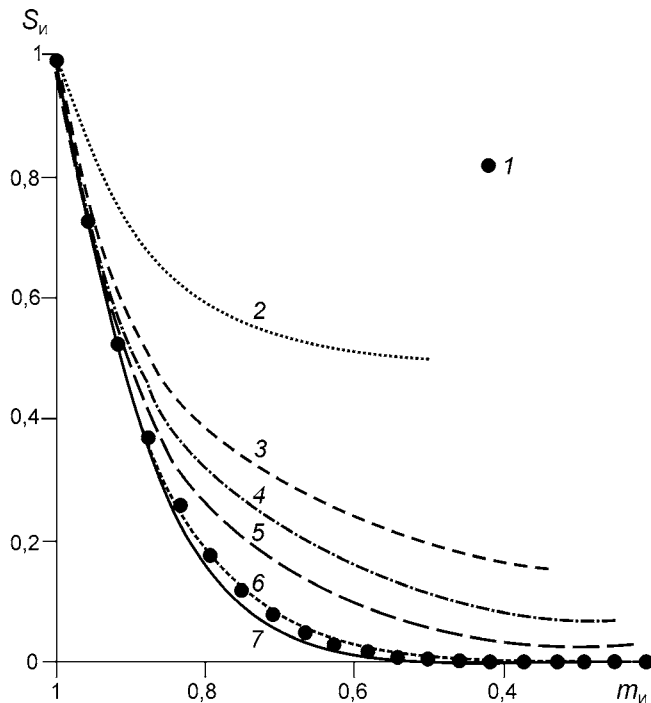


Рис. 4. Динамика опреснения по формуле (1) – I и минерализации пористого льда при таянии при коэффициенте диффузии $D_d = n \cdot 10^{-9}$, м²/с:

n равно: 2 – 0,01; 3 – 0,05; 4 – 0,1; 5 – 0,2; 6 – 0,8; 7 – 0,24

Fig. 4. Dynamics of desalination by the formula (1) – I and mineralization of porous ice under thawing to the diffusion coefficient $D_d = n \cdot 10^{-9}$ м²/с:

n equals to: 2 – 0.01; 3 – 0.05; 4 – 0.1; 5 – 0.2; 6 – 0.8; 7 – 0.24

расчёты по формуле (1) совпадают с расчётами по модели при значении коэффициента диффузии $D_d = 0,8 \cdot 10^{-9}$ м²/с. При $D_d = 0,01 \cdot 10^{-9}$ м²/с динамика выхода ионов солей на порядок ниже, чем при расчётах по формуле (1).

С целью определения значения коэффициента диффузии ионов солей в плёнке рассола на гранулах льда была сопоставлена динамика минерализации массива пористого льда при таянии для разных ионов солей по данным измерений и результатам расчётов по модели с учётом разных значений коэффициента диффузии (рис. 5). Расчёты проводились при влажности пористого льда при таянии 12%, диаметре ледяных гранул 1,5 мм, температуре воздуха 5 °С и интенсивности таяния 0,5 см/сутки на 1 °С. Таким образом, для ионов солей Ca^{2+} значения $D_d \approx 0,08 \cdot 10^{-9}$ м²/с; для ионов K^+ – $D_d \approx (0,1 \div 0,2) \cdot 10^{-9}$ м²/с; для ионов Mg^{2+} – $D_d \approx (0,2 \div 0,4) \cdot 10^{-9}$ м²/с. При этом при таянии более 40% объёма массива содержания иона Mg^{2+} не уменьшаются; для ионов Na^+ , Cl^- и SO_4^{2-} зна-

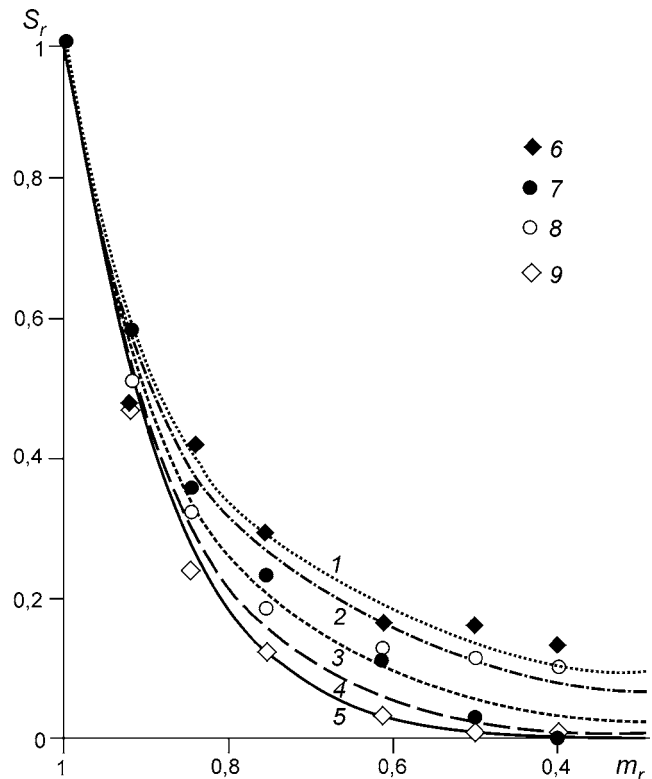


Рис. 5. Динамика опреснения при коэффициенте диффузии $D_d = n \cdot 10^{-9}$, м²/с:

n равно: 1 – 0,08; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,4; 5 – 0,8; для ионов: 6 – Ca^{2+} ; 7 – K^+ ; 8 – Mg^{2+} ; 9 – Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}

Fig. 5. Dynamics of desalination under the diffusion coefficient $D_d = n \cdot 10^{-9}$ м²/с:

n equals to: 1 – 0.08; 2 – 0.1; 3 – 0.2; 4 – 0.4; 5 – 0.8; for ions: 6 – Ca^{2+} ; 7 – K^+ ; 8 – Mg^{2+} ; 9 – Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}

чение $D_d \approx 0,8 \cdot 10^{-9}$ м²/с. Для этого значения D_d результаты расчётов совпадают с расчётами по формуле (1). Наименее подвижные – гидрокарбонатные ионы HCO_3^- , для которых значение $D_d \approx (0,005 \div 0,008) \cdot 10^{-9}$ м²/с. Небольшой выход ионов отдельных солей обусловлен их низкой концентраций в плёнке рассола в конце таяния. При таянии половины массива содержание отдельных ионов составило менее 0,05 г/л.

Возможность применения опреснения дренажных и дренажно-сбросных вод с оросительных систем методом зимнего дождевания в некоторых регионах России

Знание коэффициента диффузии ионов солей позволяет оценить эффективность опреснения методом зимнего дождевания для вод

Таблица 2. Химический состав дренажных и дренажно-сбросных вод с оросительных систем по регионам Российской Федерации*

Регион	Минерализация, г/л	Концентрация ионов (мг/л) и значение pH						
		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	pH
Алтайский край	0,3–2,2/0,5	128,0–492,7/182,6	28,0–456,2/66,5	61,5–884,2/148,4	44,0–107,0/56,2	10,7–70,0/21,7	22,0–696,7/101,2	7,6
Астраханская область	0,4–1,96/1,2	77,0–0,421/230,2	42,0–559,0/219,9	85,0–744,0/349,0	45,0–243,0/123,1	16,0–180,0/58,2	38,0–409,0/162,8	–
Волгоградская область	0,3–24,4/2,8	68,0–737,0/368,1	14,0–5285,0/402,2	20,0–13845,0/1201,8	12,0–920,0/139,6	5,0–1008,0/120,4	3,0–6110,0/585,7	6,7–9,4/7,9
Караево-Черкесская Республика	0,3–0,6/0,4	250,3–398,0/329,3	13,8–22,7/18,4	24,5–220,0/122,0	53,7–76,1/–	19,4–42,6/31,0	26,4–110,4/59,7	8,2
Липецкая область	0,4–0,7/0,5	220,0–360,0/288,2	18,0–42,0/27,7	43,0–115,0/64,2	64,0–132,0/96,0	11,0–34,0/16,7	7,0–15,0/12,0	7,6–7,9/7,7
Республика Калмыкия	1,2–10,6/6,7	224,0–395,0/313,5	297,0–3850,0/1601,0	432,0–4080,0/2438,0	40,0–750,0/412,5	126,0–570,0/365,0	211,0–2503,0/1276,7	7,0–8,0/7,8
Ростовская область	0,8–8,8/2,2	240,0–416,9/308,3	89,8–3905,7/377,8	452,0–1846,4/967,3	97,5–277,5/169,9	33,2–317,2/98,8	129,6–2412,1/441,7	7,6–8,1/7,8
Самарская область	0,3–0,4/0,3	128,0–205,0/153,0	36,0–58,0/42,0	38,0–98,0/68,0	48,0–68,0/61,0	9,0–20,0/14,0	6,0–40,0/16,0	7,3

*В числителе – пределы изменения показателя (min–max), в знаменателе – среднее значение показателя по региону. Значения показателей химического состава дренажных вод по Волгоградской области даны осреднёнными за общий период наблюдения с 1971 по 2002 г., по остальным регионам – за 2003 г.

разного минерального состава. В табл. 2 приведён химический состав дренажных и дренажно-сбросных вод с оросительных систем по регионам Российской Федерации [17, 18]. Из неё видно, что наибольшая минерализация этих вод характерна для Республики Калмыкия – 6,7 г/л, а также Волгоградской – 2,8 г/л, Ростовской – 2,2 г/л и Астраханской областей – 1,2 г/л. В остальных областях среднее значение минерализации меньше 1 г/л. Самые высокие значения минерализации – 24,4 г/л – отмечены в Волгоградской области. На эту же область приходятся самые высокие значения малоподвижного иона HCO₃⁻, динамика выхода солей которого наименьшая. Однако его вклад в минеральный состав дренажных вод составляет 13%, что снижает его отрицательное влияние на эффективность применения метода зимнего дождевания для опреснения минерализованных вод. В большинстве указанных областей и республик зимние условия позволяют применять зимнее дождевание для опреснения минерализованных вод.

Выводы

Результаты исследований показали, что динамика опреснения пористого льда, намороженного из минерализованных вод разного химического состава, зависит от подвижности ионов солей, которая определяется коэффициентом диффузии. Выполнены модельные расчёты средней минерализации пористого льда при таянии и определены концентрации ионов различных солей. Сравнение измеренной динамики содержания ионов солей в пористом льду при таянии и результатов расчётов позволило определить значения коэффициентов диффузии ионов солей в плёнке рассола ледяных гранул. Коэффициент диффузии ионов Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ на порядок больше чем Ca²⁺ и на два порядка чем HCO₃⁻. Это приводит к тому, что содержание ионов солей Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ уменьшается в пористом льду при таянии в 3 раза быстрее, чем содержание ионов Ca²⁺. На основе химического анализа дренажных вод некоторых районов России показана возможность применения опреснения пористого льда, образованного при зимнем дождевании.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Института географии РАН. 79. № 01201352477.

Acknowledgments. This work received financial support from the Institute of Geography RAS (Program. 79. № 01201352477).

Литература

References

1. Санин М.В. Использование ресурсов вод повышенной минерализации путем их опреснения. М.: Наука, 1988. 145 с.
2. Martel C. James. How freezing temperatures can be used for wastewater treatment // *Water Environment & Technology*. August 1998. V. 10. № 8. P. 50–53.
3. Сосновский А.В., Ходаков В.Г. Искусственное льдообразование в природных условиях для решения экологических проблем // МГИ. 1995. Вып. 79. С. 3–6.
4. Сосновский А.В. Особенности процесса опреснения соленых вод при факельном намораживании льда // МГИ. 1988. Вып. 61. С. 143–149.
5. Гохман В.В., Сосновский А.В., Ходаков В.Г. Эксперименты по опреснению пористого льда // МГИ. 1990. Вып. 69. С. 201–204.
6. Востокова Т.А., Гохман В.В., Сосновский А.В. Динамика выхода ионов при таянии пористого льда // МГИ. 1993. Вып. 76. С. 14–19.
7. Конторович И.И., Мариненко В.Е., Варламов Н.Е., Алимов А.Г., Брызгалин А.Д., Бальбеков Р.А. Применение метода зимнего дождевания для опреснения дренажного стока в условиях Нижнего Поволжья // Экологические основы орошаемого земледелия: Материалы Всерос. совещ. М.: изд. ВНИИГиМ, 1995. С. 262–273.
8. 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.
9. Конторович И.И. Технология опреснения дренажных вод методом зимнего дождевания // Современные проблемы мелиорации и пути их решения: Сб. науч. трудов. ВНИИГиМ: Т. 2. М.: изд. ВНИИГиМ, 1999. С. 183–199.
10. Архипов С.М., Евсеев А.В., Востокова Т.В. Преобразование геохимических характеристик снежного покрова в период абляции // МГИ. 1990. Вып. 70. С. 95–101.
11. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 527 с.
12. Сосновский А.В. Численное моделирование массообмена при таянии минерализованного пористого льда // МГИ. 2003. Вып. 94. С. 71–74.
1. Sanin M.V. *Ispol'zovanie resursov vod povyshennoy mineralizatsii putem ikh opresneniya*. Utilization of resources of large salinity water by their desalination. Moscow: Nauka, 1988: 145 p. [In Russian].
2. Martel C. James. How freezing temperatures can be used for wastewater treatment. *Water Environment & Technology*. 1998: 10 (8): 50–53.
3. Sosnovskiy A.V., Khodakov V.G. Artificial ice formation in natural conditions for the solution of environmental problems. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1995, 79: 3–6. [In Russian].
4. Sosnovskiy A.V. Features of the desalination process of salt water under flare freezing of ice. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1988, 61: 143–149. [In Russian].
5. Gokhman V.V., Sosnovskiy A.V., Khodakov V.G. Experiments on desalination of porous ice. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1990, 69: 201–204. [In Russian].
6. Vostokova T.A., Gokhman V.V., Sosnovskiy A.V. Dynamics of the ion yield at thawing of porous ice. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1993, 76: 14–19. [In Russian].
7. Kontorovich I.I., Marinenko V.E., Varlamov N.E., Alimov A.G., Bryzgalin A.D., Bal'bekov R.A. Application of the method of winter irrigation to desalinate drainage flow conditions in the Lower Volga region. *Ekologicheskie osnovy oroshaemogo zemledeliya*: Ecological base of irrigated agriculture. Proc. of the All-Russia meeting. Moscow: VNIIGiM, 1995: 262–273. [In Russian].
8. Sosnovskiy A.V. *Zakonomernosti formirovaniya i ispol'zovaniya iskusstvennykh firново-ledyanykh massivov*. Peculiarities of formation and use of artificial firn-ice masses. PhD thesis. Institute of Geography, Russian Academy of Sciences. Moscow. 2010: 301 p. [In Russian].
9. Kontorovich I.I. The technology of desalination of drainage water by winter sprinkling. *Sovremennye problemy melioratsii i puti ikh resheniya*. Modern problems of reclamation and their solutions: Proc. of. VNIIGiM. V. 2. Moscow. 1999: 183–199. [In Russian].
10. Arkhipov S.M., Evseev A.V., Vostokova T.V. The transformation of geochemical characteristics of snow cover during ablation. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1990, 70: 95–101. [In Russian].
11. Perel'man A.I. *Geokhimiya*. Geochemistry. Moscow: Vysshaya shkola. High School, 1989: 527 p. [In Russian].
12. Sosnovskiy A.V. Numerical simulation of mass transfer during the melting of mineralized porous ice. *Materialy*

13. Dynamics of snow and ice masses / Ed. by S.C. Colbeck. New York: Academic Press, 1980. 468 p.
14. Гребер Г., Эрк С., Григуль У. Основы учения о теплообмене. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 567 с.
15. Albert M.R. Some numerical experiments on firn ventilation with heat transfer // *Annals of Glaciology*. 1993. V. 18. P. 161–165.
16. Waldner P., Schneebeli M. Effect of snow structure on water flow and solute transport // *Hydrological Processes*. 2004. V. 18. P. 1271–1290.
17. Капустян А.С., Юченко Л.В., Старостина О.А. Качество дренажно-сбросных вод оросительных систем // *Современные проблемы мелиорации земель, пути и методы их решения: Ч. 1*. Новочеркасск: изд. ФГНУ «РосНИИПМ», 2003. С. 160–164.
18. Конторович И.И. Дренажный сток с оросительных систем Волгоградской области как объект утилизации // *Научно-производственное обеспечение развития комплексных мелиораций Прикаспия*. М.: Изд-во «Современные тетради», 2006. С. 195–212.
- Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2003, 94: 71–74. [In Russian].
13. Dynamics of snow and ice masses. Ed. by S.C. Colbeck. New York: Academic Press, 1980: 468 p.
14. Greber G., Erk S., Grigull U. *Osnovy ucheniya o teploobmene*. Fundamentals of heat transfer. Moscow: Publishing House of Foreign literary. 1958: 567 p. [In Russian].
15. Albert M.R. Some numerical experiments on firn ventilation with heat transfer. *Annals of Glaciology*. 1993, 18: 161–165.
16. Waldner P., Schneebeli M. Effect of snow structure on water flow and solute transport. *Hydrological Processes*. 2004, 18: 1271–1290.
17. Kapustyan A.S., Yushchenko L.V., Starostina O.A. The quality of drainage water irrigation systems // *Sovremennye problemy melioratsii zemel', puti i metody ikh resheniya*. Current problems of land reclamation, the ways and methods of their solutions. Pt. 1. Novocherkassk, 2003: 160–164.
18. Kontorovich I.I. Drain runoff from irrigation systems of Volgograd region as an object of utilization. *Nauchno-proizvodstvennoe obespechenie razvitiya kompleksnykh melioratsiy Prikaspiya*. Scientific-production software development of complex reclamation in Caspian. Moscow: Izd-vo Moscow: Publishing house «Sovremennye tetradi», 2006: 195–212. [In Russian].