

Применение природного холода для очистки и опреснения солёных вод

Введение

Проблема водных ресурсов, рационального их использования, защита от истощения и загрязнения, их восстановление является одной из актуальных проблем устойчивого развития территорий. Её острота возрастает в связи с ростом загрязнения водных объектов. В связи с этим всё большую актуальность приобретает разработка экономичных и технологически доступных способов очистки и опреснения загрязнённых минерализованных природных и техногенных вод.

Одним из путей её решения является опреснение воды. Однако применение промышленных способов опреснения требует больших капитальных и энергетических затрат. Известные в настоящее время промышленные способы опреснения природных и техногенных вод неэффективны для деминерализации и очистки больших объёмов промышленных, сельскохозяйственных и бытовых сточных вод в силу высокой себестоимости опреснённой воды и необходимости предварительной очистки воды от нерастворимых примесей.

Способы опреснения, основанные на применении возобновляемых видов природной энергии, таких как солнечная радиация, ветер, природный холод дают небольшую производительность в силу рассредоточенности такой энергии в пространстве и трудностей её концентрации. Поэтому основной проблемой применения практически неисчерпаемых и экологически безвредных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является разработка эффективных, экономичных и технологически доступных способов их эффективного использования для очистки и опреснения загрязнённых минерализованных природных и техногенных вод.

Одним из известных способов опреснения является вымораживание воды с использованием естественного или искусственного холода. Явление опреснения

Хотя применение метода вымораживания в промышленных целях требует значительных капиталовложений для выработки искусственного холода, тем не менее, такой подход в принципе энергетически выгоднее широко распространённого метода дистилляции

воды вымораживанием известно с давних пор. В его основе лежит природный процесс разделения солёной воды при замораживании на пресные кристаллы и концентрированный рассол. Такие процессы приводят к «распреснению» многолетних морских льдов, что издавна использовалось жителями Крайнего Севера для получения пресной воды. В промышленных условиях рассол выводится из намороженного льда разными способами — естественным дренажом, вакуумной фильтрацией, центрифугированием, пресованием, а сам лёд при таянии образует пресную воду. Хотя применение метода вымораживания в промышленных целях требует значительных капиталовложений для выработки искусственного холода, тем не менее, такой подход в принципе энергетически выгоднее широко распространённого метода дистилляции. Однако получение холода пока ещё обходится значительно дороже, чем получение тепла. В разных странах были созданы опытные вымораживающие опреснительные установки, но в силу большой себестоимости опреснённой воды метод не был реализован в промышленных масштабах.

В природных условиях метод вымораживания не требует больших капиталовложений и энергетических затрат, поскольку замораживание воды происходит под воздействием естественной отрицательной температуры воздуха, а таяние льда обусловлено положительной температурой воздуха и солнечной радиацией.

Рецензия эксперта на статью получена 20.06.2018 [Expert review on the article was received on June 20, 2018].

УДК 628.165

Применение природного холода для очистки и опреснения солёных вод

А. В. Сосновский, д.г.н., ведущий научный сотрудник, Институт географии Российской Академии Наук

Рассмотрены теоретические и практические вопросы применения зимнего дождевания для формирования многометровых массивов пористого льда с небольшой минерализацией. Показана эффективность применения метода для очистки и опреснения загрязнённых минерализованных вод. На основе математического моделирования и экспериментальных исследований получена динамика выхода ионов солей при таянии пористого льда. При таянии 1/3 части массива его минерализация в 100 раз ниже, чем у замораживаемой воды.

Ключевые слова: природный холод, солёная вода, зимнее дождевание, пористый лёд, опреснение, эксперименты, математическое моделирование.

UDC 628.165

The use of natural cold for the purification and desalination of saline waters

A. V. Sosnovsky, Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences

The theoretical and practical questions of the application of winter sprinkling for the formation of multi-meter arrays of porous ice with a small mineralization are considered. The efficiency of application of the method for purification and desalination of contaminated mineralized waters is shown. On the basis of mathematical modeling and experimental studies, the dynamics of the yield of salt ions in the melting of porous ice is obtained. With thawing of 1/3 part of the massif, its mineralization is 100 times lower than that of freezing water.

Keywords: natural cold, salt water, winter sprinkling, porous ice, desalination, experiments, mathematical modeling.

Были разработаны разные методы применения природного холода по намораживанию и опреснению солёных вод, как в условиях небольших отрицательных температур воздуха [1], так и при устойчивых отрицательных средних суточных температурах воздуха [2]. В их основе лежит намораживание плотного льда.

Опреснение льда происходит только в процессе медленного оттаивания льда в тёплое время года. Известны также попытки применения спринклерных установок для диспергирования воды и намораживания массива гранулированного мелкозернистого льда. При использовании рассматриваемых способов вымораживания толщина ледяных массивов не должна превышать нескольких метров, иначе лёд будет неравномерно прогреваться и опресняться, что приведёт к низкому выходу пресной воды. Известные способы опреснения вымораживанием в природных условиях имеют небольшую производительность и низкий выход пресной воды и не нашли широкого практического применения.

Применение зимнего дождевания для опреснения солёных вод

Для устранения данных недостатков потребовалось значительно повысить производительность намораживания льда, научиться создавать ледяные массивы с пористой, легко фильтрующей воду, структурой, и небольшой отрицательной температурой, значительно снизить солёность намораживаемого льда. Эту проблему решает применение метода зимнего дождевания с использованием дальнеструйных дождевальных установок [2].

В настоящее время зимнее дождевание широко применяется для строительства автозимников и ледяных переправ [3].

Для намораживания применяются как серийные дождевальные установки, например, дождеватель дальнеструйный навесной — ДДН-70 с дальностью полёта струи 70 м (фото 1), так и специально разработанные дождеватели серии «Град». Производительность намораживания с применением серийной дождевальной установки ДДН-70 составляет порядка 75 тонн льда за сутки в пересчёте на 1 °C отрицательной температуры воздуха.

При дождевании формируется капельный факел высотой 15–20 м. При падении с многометровой высоты в условиях отрицательных температур воздуха на поверхности капля воды образует ледяную оболочку пресного льда. При этом соли и примеси вытесняются в центральную, незамерзшую часть капли. При замерзании до 50–60% объёма капли со средним диаметром 1,5 мм ледяная оболочка достаточно тонкая и разрушается при ударе о землю, освобождая заключённый в капле рассол (в противном случае формируется сухой гранулированный солёный лёд). При этом опреснению способствует инерция жидкой части капли при ударе о твёрдую поверхность. Незамерзший рассол фильтруется через массив пористого льда и удаляется. В результате в массиве остаётся небольшое количество рассола в основном в виде плёночной влаги. За один час из капельного факела на подстилающую поверхность выпадает более 100 млрд капель. Из осколков ледяных оболочек капель быстро растёт в высоту, с интенсивностью

3–10 м в сутки, массив пористого льда [4], состоящий из пресных осколков ледяных оболочек капель и небольшого количества взвешенного рассола, удерживаемого капиллярными силами [2].

Были определены ограничения на параметры капельного факела дождевальных установок в зависимости от метеорологических факторов [5]. Это позволяет



создавать большие по толщине массивы пористого льда с температурой близкой к температуре замерзания. Для оценки доли замерзания воды f в капле воды диаметром d [мм] при падении с высоты h [м] в воздухе с абсолютным значением отрицательной температуры t [°C] можно использовать зависимость:

$$f = \frac{ht}{500d^2}. \quad (1)$$

При значении параметров $d = 1,5$ мм, $h = 15$ м и $t = 15$ °C получим 20% льда в капле. При снижении температуры воздуха в два раза или при уменьшении диаметра капли в 1,4 раза доля льда в капле вырастет в два раза. При этом доля льда в капле ограничивается величиной 0,5 для предотвращения формирования сухого гранулированного льда. В последнем случае его минерализация будет равна солёности исходной воды и опреснение на стадии намораживания не произойдёт.

Были проведены многочисленные эксперименты по намораживанию, опреснению и очистке воды от микроэлементов и ионов солей [6]. Эксперименты по опреснению пористого льда были проведены со сбросными водами Балаковской АЭС (БАЭС). Для намораживания использовался один из бассейнов-накопителей сточных вод с минерализацией около 6 г/л.



Фото: ООО «Ифоре», <https://is03.info/rok.ru>

❖ Фото. 1. Дальнеструйная навесная дождевальная установка ДДН-70

Результаты экспериментов показали, что в замороженном пористом льду содержание ионов солей Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} уменьшилось в девять-десять раз, ионов Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ уменьшилось в 12–13 раз и HCO_3^- в пять раз по сравнению с исходной водой. При этом сумма ионов уменьшилась в 12 раз. Далее близкие результаты были получены сотрудниками ВНИИ гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова при зимнем дождевании на берегу озера Сарпа Волгоградской области [7].

Для оценки динамики опреснения пористого льда и выхода пресной воды при его таянии было проведено математическое моделирование тепло, массо- и солеобмена и выполнено сравнение с данными экспериментальных исследований [8]. На основе упрощённой модели опреснения получена зависимость относительной минерализации массива пористого льда от его относительного объёма:

$$s_r = m_r^\psi, \quad (2)$$

где s_r и m_r — относительные значения текущей минерализации и массы льда; $s_r = S_r/S_{л0}$; $m_r = M_r/M_{л0}$; $\psi = 1/\varphi - 1$; $S_{л0}$ и S_r , $M_{л0}$ и M_r — начальные и текущие значения минерализации и массы пористого льда; φ — влажность пористого льда при таянии, в долях.

Расчёты по этой зависимости показали хорошее соответствие с данными экспериментов [6, 9]. Эффективность опреснения зависит от влажности пористого льда. При влажности 12 % и таянии 25 (30) % объёма массива пористого льда его минерализация уменьшится в 8 (14) раз. При таянии половины массива минерализация оставшейся части снизится в 161 раз. С ростом влажности массива, например, в случае быстрого таяния, эффективность опреснения снижается.

Так, при влажности пористого льда 18 % его солёность при таянии 25 и 50 % массы массива уменьшится в четыре и 24 раза, соответственно.

Измерения минерализации образцов пористого льда, замороженного на БАЭС, показали, что при таянии 25 (50) % замороженного пористого льда содержание в нём ионов солей Ca^{2+} , Mg^{2+} уменьшилось в 35 и 48 (61 и 75) раз, ионов K^+ в 43 (308) раз, ионов Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} уменьшилось в 86–103 (733–1302) раз и HCO_3^- в 8 (9) раз по сравнению с минерализацией исходной воды. При этом сумма всех ионов солей уменьшилась в 79 (284) раз. Были проведены лабораторные эксперименты с микроэлементами хрома и меди. Степень их очистки оказалась сравнима с ионами Na. Такой же эффект очистки наблюдался при применении растворённой органики.

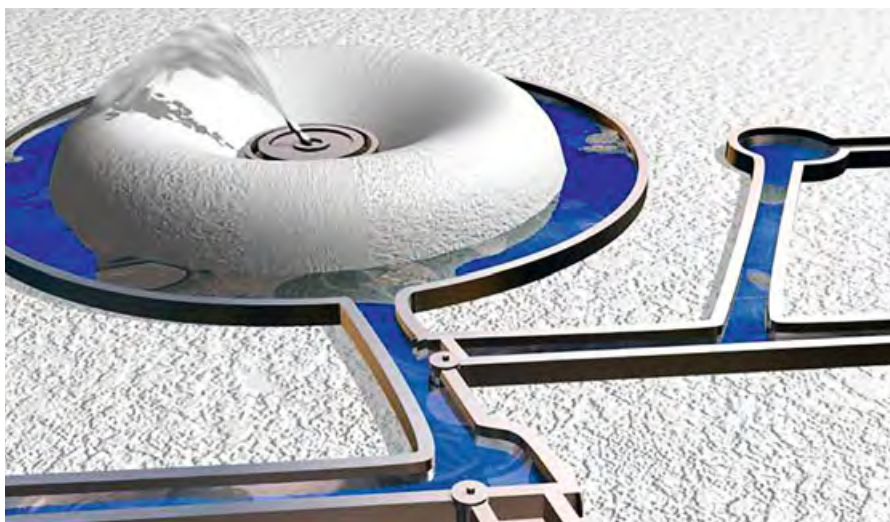


Рис. 1. Схема опреснительного комплекса в составе дождевальной установки и каналов стока незамерзшей воды, талой минерализованной и пресной воды

Расчёты и эксперименты показали, что при таянии 1/3 части объёма замороженного пористого льда минерализация оставшейся части массива приблизительно в 100 раз ниже минерализации исходной воды. Таким образом, при минерализации исходной воды до 10 г/л массив замороженного пористого льда практически пресный. При намораживании пористого льда из морской воды с солёностью 35 г/л производительность намораживания снижается. Так как в центральной незамерзшей части капли формируется рассол с повышенной минерализацией, который замерзает при более низкой температуре. Поэтому снижается перепад температуры между поверхностью капли и атмосферным воздухом.

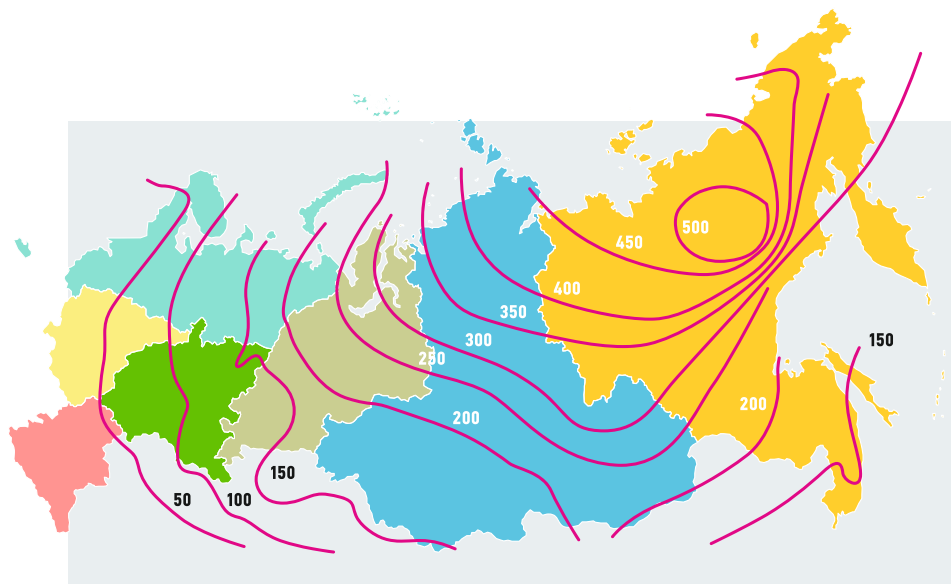
В РФ при наличии больших ресурсов отрицательных температур воздуха возможно активное применение природного холода для решения широкого круга задач с использованием метода зимнего дождевания

Рассмотренный метод капельного вымораживания (основной процесс опреснения происходит в замерзающей капле воды) использует запасы холода приземного слоя атмосферы для получения искусственного слабоминерализованного пористого льда. Последнее обуславливает ряд его особенностей — сезонный характер процесса намораживания-таяния, зависимость его от климатических и гидрологических условий, необходимость учёта ландшафтных особенностей при обустройстве опреснительного комплекса. Эти физико-географические факторы влияют на экономическую эффективность применения метода и должны учитываться при разработке соответствующ-

щих проектов. К ландшафтным условиям относятся: наличие естественных или искусственных озёр, оврагов, балок, естественных понижений рельефа местности, могущие использоваться при обустройстве водоаккумулирующих бассейнов для солёной, пресной воды и остаточных рассолов. На рис. 1 представлена возможная схема опреснительного комплекса.

На территории России при наличии больших ресурсов отрицательных температур воздуха возможно активное применение природного холода для решения широкого круга задач с использованием метода зимнего дождевания. При зимнем дождевании основной теплообмен перенесён в капельный факел, и метод получил второе название — метод факельного намораживания. Эффективность применения факельного намораживания для решения ряда народно-хозяйственных задач обусловлена его высокой производительностью, которая на порядок больше, чем при других способах намораживания [10]. На большей части территории России применение одной дождевальной установки средней мощности даёт возможность намораживать за холодный период массивы пористого льда массой от 50 до 500 тыс. тонн (рис. 2).

Одним из направлений применения факельного намораживания является защита водных ресурсов от загрязнения. Источником их загрязнения могут быть чрезвычайные ситуации, связанные с аварийным сбросом загрязнённых минерализованных вод. В зимний период для предотвращения отрицательных последствий может применяться экстренное временное замораживание таких аварийных сбросов. Был получен ряд патентов по применению зимнего дождевания для решения ряда задач, таких как способ консервации животноводческих сточных вод в зимнее время, способ промывки засоленных земель.



:: Рис. 2. Потенциальная аккумуляция пористого льда на территории России методом зимнего дождевания одной установкой ДДН-70 за холодный период

Актуальным является применение метода зимнего дождевания для восстановления загрязнённых, минерализованных водоёмов и озёр. Частичное или полное их восстановление можно достичь, забирая зимой солёную воду на намораживание — опреснение. При небольшом объёме озера вся его вода замораживается на берегу, первые порции минерализованного талого стока отводятся за пределы бассейна, а пресная вода поступает в чашу озера. При большом объёме воды в озере такая технология, периодически выполняемая из года в год, позволит понизить минерализацию воды. Такая же технология может быть применена к водоёмам с минерализованными дренажными стоками гидромелиоративных систем.

Зимнее дождевание можно применять не только для очистки и опреснения загрязнённых сточных вод различных производств, но и для водоснабжения мелких и средних потребителей путём перераспределения запасов воды между сезонами — создание массивов пористого льда в холодное время года и его использование в засушливый период.

Эффективный метод капельного вымораживания для очистки и деминерализации загрязнённых вод обусловлен не только его высокой производительностью, но и формированием пористой, легко фильтрующей рассол, структурой намораживаемого пористого льда, его небольшой минерализацией, высоким выходом опреснённой воды, низкой энергоёмкостью процесса намораживания — порядка 1,1 (2,4) кВт·ч/м³ при температуре воздуха –15 (–5) °С.

Метод не требует предварительной очистки воды и даже позволяет очищать её от нерастворимых примесей. В этом случае массив пористого льда служит естественным фильтром. При реализации

метода не требуется больших капитальных, эксплуатационных и энергетических затрат, так как используются природные источники энергии: отрицательная температура воздуха при замораживании воды; положительная температура воздуха и солнечная радиация при таянии льда, в ходе которого осуществляется сепарация и удаление рассола. Энергия расходуется в основном для подачи воды на место проведения работ. Необходимая степень очистки опресняемой воды определяется величиной ПДК химических элементов и соединений, входящих в состав этих вод и влияющих на величину выхода пресной воды и объём остаточного рассола.

Технология опреснения минерализованной воды методом капельного вымораживания включает несколько этапов. Выбирается источник солёной воды и площадка для намораживания (возможно с небольшим уклоном), имеющая в случае фильтрующих грунтов гидроизолирующее покрытие из естественных (например, глина) или искусственных плёночных материалов. Вокруг неё сооружаются каналы стока или бортики на границе и подготавливаются бассейны для приёма рассола и пресной воды. При обустройстве площадки намораживания предусматривается сток незамерзшей в процессе зимнего дождевания воды и её использование для повторного намораживания в целях снижения объёма остаточного рассола и повышения его концентрации. В холодный период года проводятся работы по намораживанию ледяных массивов. При отсутствии ветра для более интенсивного охлаждения капельного факела задаётся режим дождевания по сектору. С потеплением проводятся мероприятия по отводу, консервации или утилизации рассола и аккумуляции пресной талой воды. Первые её

порции имеют повышенную минерализацию. После естественной промывки ледяного массива талой водой начнёт поступать пресная вода, минерализация которой будет постоянно снижаться до значений 1–10 мгл/л в конце периода таяния.

Заключение

Результаты проведённых исследований показали, что высокая производительность намораживания, эффективность опреснения, технологичность, а также широкая доступность и экономичность позволят успешно применять капельное вымораживание в районах с зимними температурами воздуха ниже –10...–5 °С для очистки и опреснения загрязнённых минерализованных вод (промышленных, бытовых и сельскохозяйственных стоков, шахтных вод и т.п.), «распределения» солёных озёр и водоёмов и решения ряда других задач, направленных на защиту природных вод от загрязнения и улучшения их качества.

Благодарности: обработка данных экспериментальных исследований выполнялась в рамках фундаментальных научных исследований по проекту №01201352474, а математическое моделирование и расчёты — при поддержке программы прорывных технологий в интересах национальной безопасности».

1. Геллер С.Ю. Опреснение солёных вод естественным вымораживанием в сельскохозяйственном производстве // Известия АН СССР. Серия: География, 1962. №5. С. 71–77.
2. Сосновский А.В., Хоذاков В.Г. Искусственное льдообразование в природных условиях для решения экологических проблем // Материалы гляциологических исследований, 1995. Т. 79. С. 3–6.
3. ВСН 137–89. Проектирование, строительство и содержание зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и Северо-Востока СССР. — М.: Минтрансстрой СССР, 1991. 87 с.
4. Сосновский А.В. Искусственный фирн и системы кондиционирования воздуха // Журнал С.О.К., 2014. №12. С. 78–81.
5. Сосновский А.В. Искусственные фирново-ледяные массивы и перспективы их использования для защиты водных ресурсов от загрязнения // Лёд и снег, 2011. №2. С. 135–142.
6. Сосновский А.В., Гохман В.В. Экспериментальные исследования по опреснению пористого льда // Лёд и снег, 2010. №2. С. 118–126.
7. Конторович И.И., Сосновский А.В. Влияние метеорологических условий на интенсивность таяния и опреснение минерализованного искусственного фирна // Материалы гляциологических исследований, 2009. Т. 107. С. 38–44.
8. Сосновский А.В. Численное моделирование массообмена при таянии минерализованного пористого льда // Материалы гляциологических исследований, 2003. Т. 94. С. 71–74.
9. Сосновский А.В., Конторович И.И. К расчёту опреснения минерализованного пористого льда при таянии // Лёд и снег, 2016. №4. С. 545–554.
10. Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В. Физико-географические закономерности формирования искусственных фирново-ледяных массивов // Лёд и снег, 2014. №2. С. 113–120.

References — see page 91.

The use of natural cold for the purification and desalination of saline waters. Pp. 38–41.

A. V. Sosnovsky, Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences

1. Geller S.Ju. *Opresnenie solenyyh vod estestvennym vymorazhivaniem v sel'skhozajstvennom proizvodstve* [Desalination of saline waters by natural freezing in agricultural production]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya: Geografija* [Proc. of the Academy of Sciences of the USSR. Series: Geography]. 1962. No. 5. Pp. 71–77.
2. Sosnovskij A.V., Hodakov V.G. *Iskusstvennoe l'doobrazovanie v prirodnyh usloviyakh dlja resheniya jeologicheskikh problem* [Artificial ice formation in natural conditions for the solution of environmental problems]. *Materialy glaciologicheskikh issledovaniy* ["Data of Glaciological Studies" Magazine]. 1995. Vol. 79. Pp. 3–6.
3. VSN [Departmental building codes] 137-89. *Proektirovanie, stroitel'stvo i soderzhanie zimnih avtomobil'nyh dorog v usloviyakh Sibiri i Severo-Vostoka SSSR* [Design, construction and maintenance of winter roads in the conditions of Siberia and the Northeast of the USSR]. Moscow. *Mintransstroj SSSR* [Ministry of Transport Construction of the USSR]. 1991. 87 p.
4. Sosnovskij A.V. *Iskusstvennyy firn i sistemy kondicionirovaniya vozduha* [Artificial firn and air conditioning systems]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2014. No. 12. Pp. 78–81.
5. Sosnovskij A.V. *Iskusstvennye firnovy-ledjanye massivy i perspektivy ih ispol'zovaniya dlja zashhity vodnyh resursov ot zagryazneniya* [Artificial firn-ice massives and prospects of their use for protection of water resources from pollution]. *Ljod i sneg* ["Ice and snow" Magazine]. 2011. No. 2. Pp. 135–142.
6. Sosnovskij A.V., Gohman V.V. *Jeksperimental'nye issledovaniya po opresneniju poristogo l'da* [Experimental studies on desalination of porous ice]. *Ljod i sneg* ["Ice and snow" Magazine]. 2010. No. 2. Pp. 118–126.
7. Kontorovich I.I., Sosnovskij A.V. *Vlijanie meteorologicheskikh uslovij na intensivnost' tajanja i opresnenie mineralizovannogo iskusstvennogo firna* [Influence of meteorological conditions on the intensity of melting and desalination of mineralized artificial firn]. *Materialy glaciologicheskikh issledovaniy* ["Data of Glaciological Studies" Magazine]. 2009. Vol. 107. Pp. 38–44.
8. Sosnovskij A.V. *Chislennoe modelirovanie massoobmena pri tajanii mineralizovannogo poristogo l'da* [Numerical modeling of mass transfer on mineralized and porous ice melting]. *Materialy glaciologicheskikh issledovaniy* ["Data of Glaciological Studies" Magazine]. 2003. Vol. 94. Pp. 71–74.
9. Sosnovskij A.V., Kontorovich I.I. *K raschjotu opresneniya mineralizovannogo poristogo l'da pri tajanii* [The calculation of desalination of mineralized porous ice at thawing]. *Led i sneg* ["Ice and snow" Magazine]. 2016. No. 4. Pp. 545–554.
10. Sosnovskij A.V., Nakalov P.R., Nenashev S.V. *Fiziko-geograficheskie zakonomernosti formirovaniya iskusstvennyh firnovy-ledjanyh massivov* [Physical-geographical aspects of formation of artificial firn-ice massive]. *Ljod i sneg* ["Ice and snow" Magazine]. 2014. No. 2. Pp. 113–120.