

# Прикладные проблемы

УДК 628.165:551.322

## Физико-географические закономерности формирования искусственных фирново-ледяных массивов

© 2014 г. А.В. Сосновский, П.Р. Накалов, С.В. Ненашев

Институт географии РАН, Москва  
alexandr\_sosnovskiy@mail.ru

### Physical-geographical aspects of formation of artificial firn-ice massives

A.V. Sosnovsky, P.R. Nakalov, S.V. Nenashev

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow

*Статья принята к печати 25 декабря 2013 г.**Карты, климатические изменения, намораживание фирна.  
Climatic changes, freezing of firn, maps.*

Построены карты суточной производительности намораживания искусственного фирна методом зимнего дождевания для каждого месяца с отрицательной температурой воздуха ниже  $-5^{\circ}\text{C}$  на территории России. Оценена потенциально возможная производительность намораживания ледяного материала методами зимнего дождевания и тонкослойным наливом в современных климатических условиях. Рассмотрена роль климатических изменений в снижении производительности намораживания в разных регионах России. Анализ климатических условий в 1961–2000 и 2001–2010 гг. показал, что на территории России производительность намораживания искусственного фирна снизилась с 5–10% в Сибири до 20–40% в центральных и южных районах Европейской территории России.

Analysis of climatic conditions over the period 1961–2000 and 2001–2010 showed that in Russia the productivity of freezing artificial firn decreased from 5–10% in Siberia to 20–40% in the central and southern regions of the European part of Russia. Potentially possible productivity of method of thin-layer freezing varies from 56 m layer of monolithic ice in the northern regions of Siberia up to 10 m in the central areas of the European part of Russia.

### Введение

История применения льда и снега в народном хозяйстве, методы искусственного намораживания и работы учёных и специалистов, внёсших большой вклад в это направление инженерной гляциологии, рассмотрены в работе [6]. К наиболее эффективным методам получения ледяного материала относится факельное льдообразование. Метод факельного льдообразования для намораживания искусственных фирново-ледяных массивов был разработан в Институте географии АН СССР в конце 1970-х годов. В нём эффективно используются запасы холода приземного слоя атмосферы, что позволяет на порядок повысить интенсивность теплообмена и создавать за сутки многометровые искусственные фирново-ледяные массивы.

Рассматриваемый метод сразу стал применяться при строительстве ледовых переправ и автотоннелей, вошёл в ведомственные нормы. Для реализации метода применяется зимнее дождевание. Рекомендации по его применению даны в ведомственных строительных нормах по проектированию, строительству и содержанию зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и

Северо-Востока СССР, разработанных в Минтрансстрое СССР [2]. Экологические аспекты использования метода защищены авторскими свидетельствами и патентами. Данный метод на протяжении многих лет применялся для утилизации дренажных вод гидромелиоративных систем в Волгоградском филиале ГНУ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова Россельхозакадемии. Основным параметром, определяющим производительность намораживания искусственных фирново-ледяных массивов, — температура воздуха. Климатические процессы способствуют изменению производительности метода, поэтому нам необходимо оценить как производительность метода в разных физико-географических условиях в настоящее время, так и её изменение по сравнению с более ранними периодами.

### Методика расчёта производительности намораживания искусственных фирново-ледяных массивов

Для зимнего дождевания применяют серийную дождевальную установку ДДН70 (дождеватель дальнеструйный навесной с дальностью полёта струи 70 м) и специально разработанную, в

том числе на базе ДДН70, установку для зимнего дождевания серии «Град». Основу метода дождевания составляет перенос теплообмена с поверхности намораживания в объём капельного факела, возникающего из струи воды, рассеиваемой дождевальной установкой в морозном воздухе. Выпадающая водоледяная смесь аккумулируется на поверхности, не растекается и не деформируется до полного смерзания. Экспериментальные исследования позволили установить следующую зависимость доли льда  $p$ , образующейся при факельном льдообразовании в случае работы дождевальной установки ДДН70 с насадкой диаметром 55 мм [3]:

$$p = 0,01(3 + 1,2|T_{\text{в}} - T_{\text{з}}|)(0,875 + 0,026v), \quad (1)$$

где  $T_{\text{в}}$  – температура атмосферного воздуха, °С;  $T_{\text{з}}$  – температура замерзания воды, °С;  $v$  – скорость ветра, м/с.

Факельное льдообразование применяется при температуре атмосферного воздуха ниже  $-5$  °С. При более высоких температурах льдообразование происходит в основном на намораживаемой поверхности с образованием ледяной шуги из-за переохлаждения капель воды в воздухе. В случае небольших отрицательных температура воздуха применяют насадки меньшего диаметра, которые позволяют увеличить давление на выходе и за счёт уменьшения среднего размера капель повысить долю льда в капельном факеле, хотя при этом снижается расход воды. Отметим, что производительность намораживания меняется незначительно [7].

Согласно формуле (1), рост скорости ветра на 1 м/с увеличивает интенсивность факельного льдообразования на 2,5%. Такое небольшое влияние скорости ветра на интенсивность факельного льдообразования обусловлено тем, что при свободном падении капли воды сразу подхватываются горизонтальными порывами ветра и быстро достигают значений горизонтальной скорости, близких к скорости ветра [4]. В результате скорость их обдува горизонтальным потоком воздуха на порядок меньше, чем скорость самого ветра. Однако именно скорость движения капли относительно скорости воздуха определяет тепло- и массообмен между поверхностью капли и атмосферным воздухом. При этом вертикальная составляющая скорости падения капли практически не изменяется.

Совсем другая картина наблюдается при послойном намораживании льда методом тонко-

слояного налива. В этом случае поверхность намораживания фиксирована в пространстве и интенсивность теплообмена в значительной степени зависит от скорости ветра. При небольшой скорости ветра основное поступление воздуха в капельный факел происходит при вращении ствола дождевальной установки и захвате новых объёмов холодного воздуха. Интенсивность вовлечения объёма воздуха в факел при вращении ствола дождевальной установки соответствует вентиляции факела при скорости ветра 5 м/с. При скоростях ветра больше 8–10 м/с условия разбиения дождевальной струи на капли ухудшаются и высота факела снижается. В результате рост скорости обтекания капли воздухом компенсируется отрицательным влиянием скорости ветра на параметры капельного факела. При скорости ветра 5 м/с из формулы (1) получим следующую зависимость для расчёта суточного объёма намораживания искусственных фирново-ледяных массивов  $Q$ :

$$Q = 0,01G(3 - 1,2T_{\text{в}}), \text{ т}, \quad (2)$$

где  $G = 5616$  м<sup>3</sup>/сут. – расход воды дождевальной установкой;  $T_{\text{в}}$  – средняя месячная температура воздуха, °С.

Формула (2) позволяет оценить величину намораживания снизу, так как не учитывает теплообмен между намораживаемой горизонтальной поверхностью и атмосферой. После падения замерзающих капель на поверхности земли продолжится промерзание незамёрзшей части воды за счёт теплообмена с воздухом, хотя интенсивность намораживания на горизонтальной поверхности падает из-за небольшой поверхности теплообмена. Для учёта этого теплообмена можно воспользоваться формулой В.А. Бобкова, которая хорошо зарекомендовала себя при расчёте интенсивности послойного намораживания льда [1]:

$$q = T_{\text{в}}(1 + v/2)/3, \quad (3)$$

где  $q$  – интенсивность намораживания льда, см воды/сут.

Из формулы (3) видно, что при скоростях ветра 1 и 4 м/с интенсивность намораживания отличается в 2 раза, а при скоростях ветра 1 и 7 м/с – в 3 раза. При расчёте интенсивности намораживания искусственных фирново-ледяных массивов к суточной производительности факельного намораживания следует добавить объём замёрзшей воды на намораживаемой площади за счёт поверхностного теплообмена. Так, при температуре воздуха  $-20$  °С за сутки в факеле образуется около

1500 т искусственного фирна. При скорости ветра 5 м/с на площади дождевания 1000 м<sup>2</sup> дополнительно образуется 200 т в результате поверхностного теплообмена. При зимнем дождевании температура воздуха в капельном факеле на 15–25% выше окружающего атмосферного воздуха. По окончании дождевания на заданной площади избыток воды будет фильтроваться через массив, что приведёт к его промерзанию. При этом рост льдо-содержания будет происходить в результате замерзания взвешенной влаги.

Если солёность намораживаемой воды повышается, то интенсивность намораживания падает. Расчёты показали, что применение для факельного намораживания морской воды с солёностью 35 г/л уменьшает производительность намораживания на 15–20%, тогда как применение рассолов снижает её в несколько раз по сравнению с пресной водой. При более низких температурах воздуха снижение производительности намораживания менее значительно. Для учёта данного явления можно использовать коэффициент снижения интенсивности намораживания солёной воды [3].

#### **Эффективность применения искусственных фирново-ледяных массивов**

Важный фактор при оценке эффективности применения искусственных массивов – физико-географические условия проведения работ. В районах с более мягкой зимой применение зимнего дождевания с высокой эффективностью льдообразования, возможно, единственное решение ряда инженерно-гляциологических, природоохранных и рекреационных задач. В районах с суровым климатом дождевание позволяет раньше начинать эксплуатацию инженерно-гляциологических объектов. Ряд факторов, влияющих на эффективность использования искусственных фирново-ледяных массивов, обусловлен целями их применения. Именно цели создания искусственных массивов определяют выбор технологии намораживания, времени проведения работ, их продолжительности и объёмов, требуют необходимых затрат и рассмотрения особенностей функционирования таких массивов.

Например, для получения монолитного льда проводится зимнее дождевание с целью формирования слоя водолеяной смеси. При намораживании на естественном льду водного объекта под массой смеси происходит прогиб льда в случае его небольшой толщины. В результате вода

не вытекает из зоны дождевания и не повышает долю льда в водолеяной смеси более чем на 60%. В противном случае при большей концентрации фирна в смеси прочность намораживаемого льда понизится. При дождевании на твёрдое основание возможно обустройство снежно-ледяных ограждений для сохранения фазового состава водолеяной смеси. Прерывистое дождевание, необходимое для отвода времени на промерзание смеси, частая смена позиций дождевальной установки с подготовкой места для забора воды и другие мероприятия влияют на эффективность зимнего дождевания, требуют привлечения дополнительных сил и средств. Однако экономическая выгода от более раннего начала эксплуатации объекта и продление сроков его эксплуатации в весенний период за счёт структуры фирнового льда, менее подверженного разрушению под действием прямой солнечной радиации, оправдывают приложенные усилия и затраты.

Широкий спектр возможных областей применения метода зимнего дождевания, рассмотренный в работе [6], показывает перспективы использования непосредственно искусственного фирна. Намораживание фирна ведётся с одной позиции до формирования фирнового массива необходимой высоты. Для опреснения и очистки воды доля льда, образующегося в капельном факеле, не должна превышать 55%. Это обусловлено условиями разбиения ледяной оболочки капли и освобождения заключённого в ней рассола. Однако здесь возникает проблема водоотведения незамёрзшей воды или рассола и их использования для повторного дождевания. Для получения ледяного материала с целью дальнейшего его использования в системах охлаждения нет ограничений на параметры капельного факела.

Намораживание ледовых переправ и строительство автозимников начинаются в начале холодного периода после установления ледяного покрова на водных объектах. По этому льду перемещается дождеватель, при работе которого формируется водолеяная смесь толщиной в десятки сантиметров. При отсутствии установившегося ледяного покрова намораживание ведётся с берега. После промерзания водолеяной смеси образуется монолитный лёд, усиливающий ледяной покров. При этом необходимо учитывать время, затрачиваемое на промерзание этого слоя. Так, время промерзания водолеяной смеси с 50%-м содержанием льда почти в 2 раза меньше, чем промерзание аналогичного слоя воды. В Ведом-

ственных строительных нормах [2] приведено время промерзания слоя водоледяной смеси при 50%-м содержании льда. В районах с небольшими отрицательными температурами воздуха желательно ограничивать толщину такой смеси. Это связано с тем, что интенсивность промерзания слоя смеси толщиной 20 см на 30% меньше (при небольшой скорости ветра), чем толщиной 10 см. Однако при выборе необходимой толщины слоя смеси не исключается повторный проход дождевальной техники по намораживаемой площади.

При решении специальных задач по пропуску тяжёлых грузов возможно ускоренное усиление ледяных переправ методом зимнего дождевания и в течение всего холодного периода. При этом необходимо учитывать, что значительное увеличение толщины ледяного покрова на переправе через водотоки сверх установившихся естественных средних многолетних значений для данного водотока приведёт к усиленному таянию нижней поверхности переправы [5].

Для строительства гидротехнических сооружений, опреснения и эксплуатации искусственных фирново-ледяных массивов в системах охлаждения требуются большие объёмы ледяного материала, поэтому работы по намораживанию могут вестись в течение всего холодного периода. При этом начало работ по формированию искусственных массивов связано с метеорологическими условиями. Так, если усиление ледовых переправ и ледовых автозимников дождеванием в морозном воздухе рекомендуется при устойчивых отрицательных температурах воздуха ниже  $-10^{\circ}\text{C}$  [2], то для других целей начать формирование массивов можно при отрицательных температурах воздуха ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ . В последнем случае целесообразно изменять размеры дождевальной насадки для повышения доли льда в капельном факеле. Учитывая высокую производительность метода факельного намораживания, создание искусственных фирново-ледяных массивов в одной точке может происходить в течение суток, так как при формировании массива толщиной более 8–10 м значительно снижается эффективная высота факела и падает производительность льдообразования.

#### **Физико-географические аспекты создания искусственных фирново-ледяных массивов**

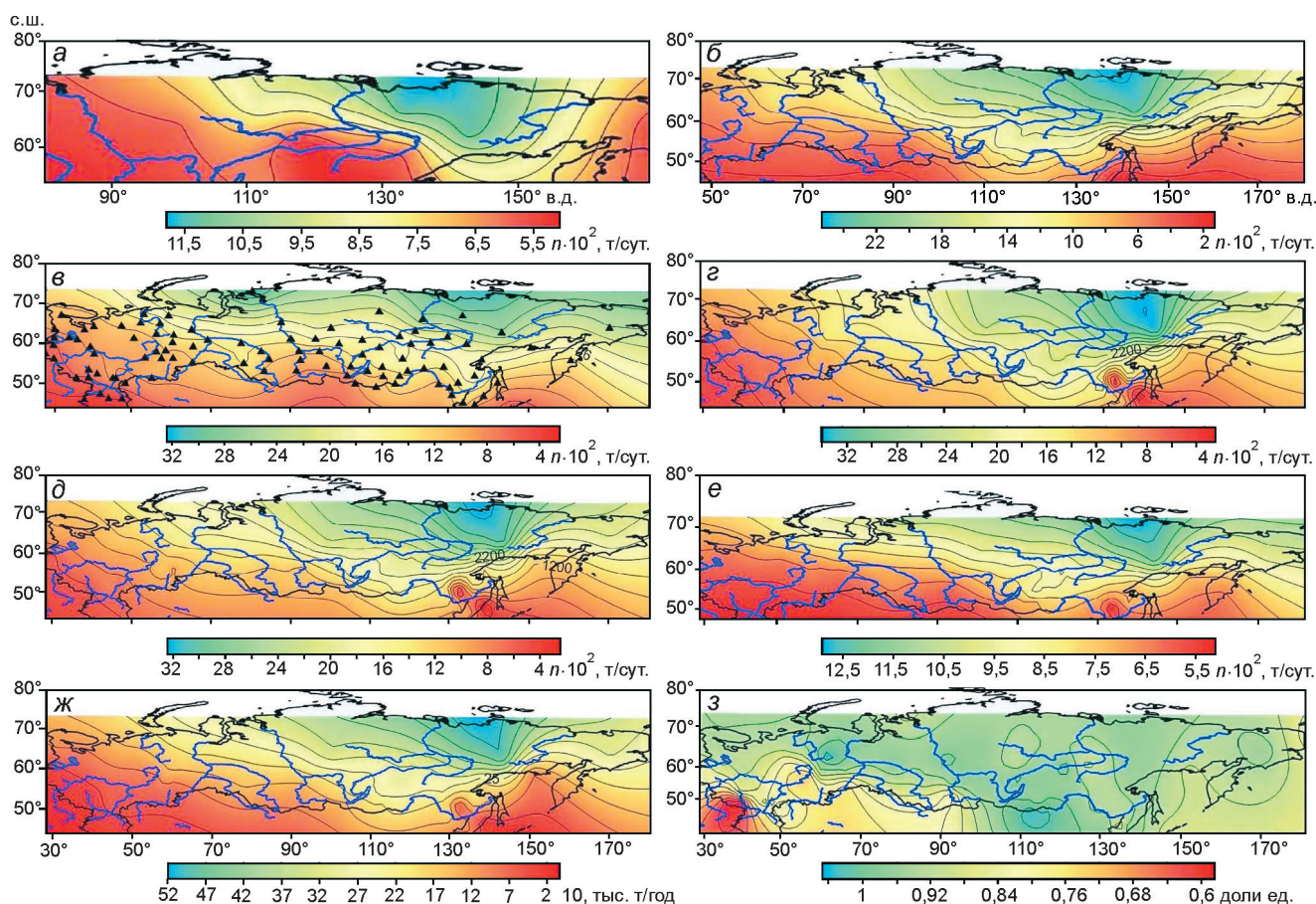
Как уже отмечалось, в зависимости от решаемой задачи искусственные массивы могут формироваться как с наступлением холодов в ограниченный временной период, так и в течение

всего холодного периода. Поэтому важно оценить не только суточную интенсивность намораживания в месяцы со средней отрицательной температурой воздуха ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ , но и потенциально возможный объём намораживания искусственных массивов в холодный период в различных физико-географических условиях.

В работе [3] приведена карта потенциального объёма намораживания таких массивов на территории России. В её основу положена температура воздуха во второй половине XX в. Расчёты показали, что производительность намораживания льда изменяется от 10–20 тыс. м<sup>3</sup> в водном эквиваленте в южных регионах России до 500 тыс. м<sup>3</sup> в самых холодных районах при работе одной дождевальной установки средней производительности ДДН70. Оценим эффективность и возможность применения метода факельного льдообразования на территории России на основе анализа климатических условий холодного периода года за 2000–2010 гг. Для этого воспользуемся средними месячными температурами воздуха по данным 100 метеостанций, приведёнными на сайте ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru>). В расчётах использовалась средняя месячная температура воздуха при её значениях ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ . На рис. 1 даны изолинии суточной производительности намораживания, потенциально возможного объёма намораживания искусственного фирна за холодный период, а также снижение потенциальной производительности намораживания искусственных фирново-ледяных массивов. Потенциально возможный слой монолитного льда, намороженный методом тонкослойного налива, и места расположения метеостанций приведены на рис. 2.

Анализ суточной производительности намораживания искусственного фирна показывает, что в октябре для центральных и северных районов Якутии производительность составляет до 1 тыс. т фирна (см. рис. 1, а); для южных районов Якутии и районов Красноярского края производительность намораживания в 2 раза ниже. В ноябре производительность намораживания в этих районах вдвое выше, чем в октябре (см. рис. 1, б). При этом возможно намораживание искусственного фирна в районах Западной Сибири и на севере Европейской территории России (ЕТР). Суточная производительность составляет 1 тыс. т на севере этих регионов и 0,5 тыс. т в центральных и южных районах Западной Сибири. В декабре суточная производительность в рассмотренных районах в 1,5 раза больше, чем в ноябре



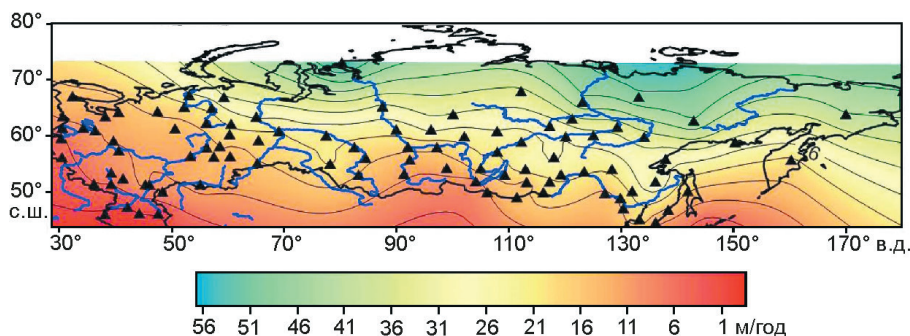


**Рис. 1.** Суточная производительность намораживания искусственного фирна (а–е), т: а – октябрь; б – ноябрь; в – декабрь; г – январь; д – февраль; е – март; ж – потенциальная производительность намораживания искусственного фирна за холодный период; з – снижение потенциальной производительности намораживания искусственных фирново-ледяных массивов

**Fig. 1.** The daily output of freezing of artificial firn (a–e) in tons: a – October; б – November; в – December; г – January; д – February; е – March; ж – the potential productivity of freezing of artificial firn during the cold period; з – diminishing the potential productivity of artificial firn freezing

(см. рис. 1, в). В январе и феврале суточная производительность искусственного фирна в Сибири приблизительно соответствует декабрьской (см. рис. 1, г и д). При этом возможно намораживание искусственного фирна и в центральных районах ЕТР, где суточная производительность составляет 0,5–1 тыс. т. В марте суточная производительность намораживания несколько больше, чем в октябре (см. рис. 1, е), намораживание возможно на всей территории Сибири и в северных районах ЕТР и более равномерно распределено по долготе. Суточная производительность намораживания составляет в среднем 1 тыс. т. Потенциально возможный объём намораживания искусственных массивов меняется от 500 тыс. т в северных районах Якутии до 10 тыс. т в центральных районах ЕТР (см. рис. 1, ж).

Как уже отмечалось, первые эксперименты по намораживанию искусственных фирново-ледяных массивов начались в конце 1970-х годов. За последние 30–35 лет климатические условия изменились. Отношение сумм отрицательных температур воздуха со средними суточными температурами воздуха ниже  $-5^{\circ}\text{C}$  за период 2001–2010 гг. к аналогичной сумме за период 1961–2000 гг. представлены на рис. 1, з. На всей территории России, за исключением южных районов Западной Сибири, центральных и южных районов ЕТР, производительность намораживания снизилась на 5–10%. В южных районах ЕТР производительность сократилась на 30–40%. В южных районах Западной Сибири и центральных районах ЕТР снижение производительности намораживания составило в среднем 20%.



**Рис. 2.** Потенциально возможная за холодный период производительность намораживания монолитного льда методом тонкослойного налива, м.

Маркер – метеостанции

**Fig. 2.** Potentially possible productivity of the method of thin-layer freezing, m.

Marker – meteorological stations

В работе [8] приведена карта изолиний возможного искусственного намораживания льда за холодный период года методом тонкослойного налива. Интенсивность намораживания принималась равной 1 см воды на 1 °С отрицательной температуры воздуха. Такая интенсивность намораживания льда, согласно эмпирической формуле (3), соответствует скорости ветра 4 м/с. При этом толщина намораживаемого слоя льда изменяется от нескольких метров на западе Европейской части территории России до 70 м на Северо-Востоке России.

На рис. 2 приведены изолинии потенциальной толщины льда, намороженного методом тонкослойного налива с учётом скорости ветра. Из него видно, что даже в районах с близкими отрицательными температурами воздуха производительность намораживания может отличаться в несколько раз. Так, производительность намораживания льда в центральных районах Якутии вдвое ниже, чем на побережье арктических морей, что обусловлено различием в скорости ветра. Эту же карту можно использовать для оценки дополнительного замерзания воды при зимнем дождевании. Потенциально возможная производительность намораживания методом тонкослойного налива изменяется от 56 м слоя монолитного льда в северных районах Сибири до 10 м в центральных районах ЕТР. При этом в отличие от намораживания искусственных фирново-ледяных массивов изменение в интенсивности тонкослойного налива в районах Сибири сохраняется по долготе. Это объясняется уменьшением скорости ветра с продвижением на восток Сибири и зависимостью интенсивности послойного намораживания от скорости ветра. Существуют два полюса наиболь-

шей производительности намораживания – север Якутии и устье р. Обь.

### Заключение

Анализ климатических условий за 1961–2000 и 2001–2010 гг. показал, что на территории России производительность намораживания искусственного фирна снизилась на 5–10% в Сибири и до 20–40% в центральных и южных районах Европейской территории России. Потенциально возможный объём намораживания искусственных фирново-ледяных массивов в настоящее время меняется от 500 тыс. т в северных районах Якутии до 10 тыс. т в центральных районах Европейской территории России. Производительность намораживания льда методом тонкослойного налива в районах с близкими отрицательными температурами воздуха может отличаться в несколько раз. Так, в центральных районах Якутии производительность намораживания льда в 2 раза ниже, чем на побережье арктических морей, что обусловлено различием в скорости ветра. Потенциально возможная производительность намораживания методом тонкослойного налива изменяется от 56 м слоя монолитного льда в северных районах Сибири до 10 м в центральных районах Европейской территории России.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы ИГ РАН. 79. № 01201352477.

### Литература

1. Бобков В.А. Производство и применение льда. М.: Пищевая промышленность, 1977. 232 с.
2. ВСН 137–89. Проектирование, строительство и содержание зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и

- Северо-Востока СССР. М.: изд. Минтрансстрой СССР, 1991. 87 с.
3. *Осокин Н.И., Сосновский А.В.* Использование гляцио-климатической информации для оценки эффективности искусственного льдообразования как метода защиты природных вод от загрязнения // МГИ. 2000. Вып. 88. С. 46–49.
  4. *Сосновский А.В.* Влияние скорости ветра на процесс льдообразования в факеле искусственного дождя // МГИ. 1986. Вып. 55. С. 225–230.
  5. *Сосновский А.В.* Расчет интенсивности таяния льда с нижней поверхности ледяной переправы // МГИ. 1993. Вып. 76. С. 138–145.
  6. *Сосновский А.В.* Искусственные фирново-ледяные массивы и перспективы их использования для защиты водных ресурсов от загрязнения // Лёд и Снег. 2011. № 2 (114). С. 135–142.
  7. *Сосновский А.В., Ходаков В.Г.* Искусственное льдообразование в природных условиях для решения экологических проблем // МГИ. 1995. Вып. 79. С. 3–6.
  8. *Ходаков В.Г.* Водно-ледовый баланс районов современного и древнего оледенения СССР. М.: Наука, 1978. 196 с.

### Summary

The paper presents results of analysis of diurnal and potentially possible efficiency of water freezing aimed at construction of artificial infiltration (firn-ice) masses on the Russia's territory. A method of jet ice-formation (winter sprinkling) developed in Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences is used for freezing of the artificial firn-ice masses. The method applies far-reaching (long-distance) sprinkler installations for spraying of water and formation of thick (more than 7 m for a day) masses of artificial firn. In winter the sprinkler allows freezing of both the monolithic ice and artificial firn. A practical

implementation of this method is licensed and realized for construction of ice passages, bridges, and winter automobile roads. Testing of the method demonstrated that the artificial firn can be used for desalination and purification of polluted salt waters with high efficiency. That is stipulated by both, the high productivity of the method (about 1500 tons of artificial firn for a day at the air temperature of  $-20^{\circ}\text{C}$ , and low mineralization of the firn relative to initial salt water.

Winter sprinkling is carried out when mean daily air temperature drops below  $-5^{\circ}\text{C}$ . Estimating of productivity of the artificial firn and monolithic ice under present-day climatic conditions was made over the Russia's territory. Analysis of the climate conditions for periods 2001–2010 and 1961–2000 have shown that reduction of the firn productivity changed from 5–10% in Siberia up to 20–40% in central and southern regions of the European Russia. At the present time, a potentially possible volume of the artificial firn freezing being produced in cold seasons changes from 500 thousand tons in northern areas of Yakutia down to 10 thousand in center of European Russia. Productivity of the monolithic ice freezing by a method of thin-layer water pouring is twice lower in central areas of Yakutia than on the Arctic seashores that is explained by differences in wind speeds. Potentially possible monolithic ice productivity made by means of thin-layer water pouring changes from 56 m of ice thickness in Northern Siberia down to 10 m in center of European Russia. The Northern Yakutia and the River Ob' mouth are two areas of maximal productivity of this method.