Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.324.4+551.578.46 doi:10.15356/2076-6734-2017-2-231-240

Оценка потенциальных запасов пресной воды в айсбергах

© 2017 г. М.С. Красс

Институт макроэкономических исследований Минэкономразвития РФ, Москва, Россия
vurga@mail.ru

Estimation of potential fresh water reserves in icebergs

M.S. Krass

Institute of Macroeconomic Research, Ministry of Economic Development of Russian Federation, Moscow, Russia
vurga@mail.ru

Received May 16, 2016 *Accepted January 31, 2017*

Keywords: ***Antarctica, Antarctic icebergs, ecology, fresh water, stratified Lake Vanda, utilization of flat icebergs.***

Summary

According to the forecast of the global shortage of fresh water it is expected that the global demand for drinking water will be increased up to 400 km^3 per a year. As the main potential resources of drinking water it is proposed to use table Antarctic icebergs. Mathematical and phenomenological models of heat exchange between the icebergs and the environment, and a process of melting of ices floes in the warm sea water are discussed. The ablation processes on the daily and lower surfaces of icebergs at different modes of towing them to points of utilization is analyzed. The most optimal technology is to fill tankers with water taken from the freshwater layer under icebergs, and then subsequent delivery of the water to points of utilization. Using of the phenomenon of fresh-salt stratified Lake Vanda is considered as one of promising technologies of the industrial water production.

Citation: Krass M.S. Estimation of potential fresh water reserves in icebergs. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017. 57 (2): 231–240. [In Russian]. doi:10.15356/2076-6734-2017-2-231-240.

Поступила 16 мая 2016 г. *Принята к печати 31 января 2017 г.*

Ключевые слова: ***Антарктика, антарктические айсберги, пресная вода, пресно-солёное озеро Ванда, утилизация айсбергов, экология.***

В условиях растущего потребления пресной питьевой воды актуальны поиски новых её ресурсов. К ним можно отнести Антарктические столовые айсберги и пресно-солёные озёра антарктических оазисов. Приведена модель теплообмена айсбергов с окружающей средой. Показана бесперспективность буксирования айсбергов в пункты их предполагаемой утилизации. Выполнены оценки и расчёты утилизации айсбергов в водах Антарктики, которые доказывают устойчивость этого процесса за счёт эффекта «двойной» диффузии. Рассмотрена также модель использования эффекта пресно-солёного озера Ванда с устойчивой стратификацией плотности вод в поле силы тяжести.

Проблема глобального дефицита пресной воды

В XX в. население земного шара выросло втрое. За этот же период потребление пресной воды возросло в семь раз, а на коммунально-питьевые нужды – в 13 раз. При таком росте потребления повсеместно возникает острый дефицит водных ресурсов. По данным Всемирной организации здравоохранения, более 2 млрд человек в мире страдают сегодня от нехватки питьевой воды. В ближайшие 20 лет, учитывая современные тенденции роста населения и мирового хозяйства, следует ожидать увеличения потребности в пресной питьевой воде не менее чем на 100 км^3 в год [1].

В 2000 г. основные компоненты потребления человечеством воды на нашей планете составили, км^3: коммунально-бытовое – 200; промышленное – 600; нужды сельского хозяйства (в основном орошение) – 3500 [2]. М.Ю. Берёзкин, руководитель научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, полагает, что в будущем перспективно продуцирование пресной воды в промышленных

масштабах путём использования атмосферного конденсата (см. [1]).

Пресная вода составляет 3% общего объёма воды на Земле. Примерно 75% мировых запасов пресной воды содержится в ледниках и айсбергах, а вся остальная вода находится главным образом под землёй в водоносных слоях. На протяжении многих тысяч лет она накапливалась в результате проникновения жидких осадков в почву, а также таяния ледников. При указанных объёмах мирового потребления воды встаёт проблема поиска её источников для удовлетворения бытовых нужд и потребления.

Водоснабжение населения России базируется в основном на поверхностных водах, качество которых непрерывно падает. В заявлении Президента Российской Федерации В.В. Путина от 27 декабря 2016 г. прямо указано на это обстоятельство: «Практически во всех регионах сохраняется тенденция к ухудшению состояния почв и земель. Значительная часть поверхностных вод оценивается сегодня как грязные и экстремально грязные. 7% жителей не обеспечены качественной питьевой водой».

Качество воды в большинстве пресноводных водоёмов России уже давно не отвечает нормативным требованиям питьевой воды. Основные источники загрязнений с поверхности почвы и из атмосферы – предприятия металлургии, химической и нефтехимической промышленности, лёгкой промышленности, целлюлозно-бумажные комбинаты и пр. Микробное загрязнение вод происходит в результате проникновения в водоёмы патогенных микроорганизмов. За последние десятилетия загрязнения с дневной поверхности вместе с атмосферными осадками проникли даже в подземные водоносные горизонты. Сегодня 70% поверхностных и до 30% подземных вод потеряли питьевое значение; теперь они перешли в категории загрязнённости «условно чистая» и «грязная», причём этот процесс интенсифицируется во времени. Почти 70% населения России употребляют воду, не соответствующую стандартам питьевой воды [3]. Рассмотрим некоторые потенциальные источники пресной воды.

Антарктические айсберги

Айсберги Антарктики представляют собой потенциальные природные источники питьевой пресной воды. Миграция многочисленных айсбергов в низкие широты привела к идее их утилизации и даже возможности доставки к месту назначения. Появились работы с обоснованием этого технически сложного предприятия, но с оптимистическими оценками. Вместе с тем в работе Г. Бадера [4] были высказаны критический подход и сомнения относительно возможности сохранения приемлемого объёма плавучего льда при его буксировке на тысячи километров через тёплый океан.

Как известно, твёрдый сток в Антарктиде, со средним годовым расходом около 14 тыс. км^3, формируется в результате откола льда с кромок её шельфовых ледников. Средняя потребность человечества в пресной питьевой воде 100 км^3/год не превышает 0,72% указанного объёма твёрдого стока. Наблюдаемая величина колебаний объёма ежегодного сброса льда в Мировой океан находится в пределах 5% и даже 10%. В этом случае объём 100 км^3/год составляет не более 10% их величины. Таким образом, изъятие изо льда Антарктиды объёма потребностей человечества не превышает пределов естественных колебаний объёма плавучего пресного льда и не может отразиться на экологическом равновесии антарктических морей. Даже увеличение потребности в питьевой воды до 500 км^3/год укладывается в рамки естественных колебаний твёрдого стока Антарктиды.

По доступности и безопасности разработки этих водных ресурсов более всего подходят антарктические «столовые» айсберги с почти ровной дневной поверхностью. Они устойчивы наплаву (особенно «молодые» глыбы). В среднем их размеры по горизонтали меняются от 500 до 2000 м, по толщине – от 200 до 400 м. Объём одного такого айсберга составляет 50–1500 млн м^3 абсолютно чистого пресного льда. Даже 50%-я утилизация льда одного айсберга покроет годовую потребность большого города в воде, не требующей очистки. Основные статьи расходов – на утилизацию льда айсберга и транспортировку полученной пресной воды до места назначения.

Основные параметры антарктических айсбергов таковы [5]: 1) мощность айсберга $h_0 = 400$ м – максимально допустимая для столовых айсбергов Антарктиды; согласно статистике, доля таких айсбергов составляет всего несколько процентов их общего числа; 2) мощность льда основной массы айсбергов не превышает 200 м, а толщина кромки шельфового ледника Роннe-Фильхнера (второй по величине после шельфо-

вого ледника Росса) почти по всём протяжении имеет именно такой порядок. Названный ледник «поставляет» в массовом порядке айсберги в море Уэдделла.

Модель теплообмена айсбергов с окружающей средой

Приведём основные соотношения, входящие в математическую модель теплообмена айсбергов с окружающей их средой [6].

1. Температура льда в теле айсберга $T_i(x, y, z, t)$ описывается обычным уравнением теплопроводности

$$\partial T_i/\partial t = a_i \Delta T_i, \quad (1)$$

где x, y, z, t – пространственные координаты и время; $a_i = \lambda_i/(c_i \rho_i)$ – температуропроводность льда; λ_i, c_i, ρ_i – соответственно теплоёмкость, плотность и теплопроводность льда; Δ – оператор Лапласа.

2. К уравнению (1) необходимо добавить также условие фазового перехода на внутренней границе ξ между талым и мёрзлым льдом, именно оно определяет перемещение этой границы:

$$(x, y, z) \in \xi[-\lambda_i \partial T_i/\partial n] = \partial\xi/\partial t, \quad (2)$$

где квадратные скобки [ ] означают скачок теплового потока на границе ξ раздела фаз; $\partial/\partial n$ – производная по нормали к границе ξ.

3. Граничные условия задачи можно разбить на три вида А, Б, В.

А. Условие теплообмена с воздухом на дневной поверхности льда [7]

$$z = h_a(x, y, t), -\lambda_i \partial T_i/\partial n = Q_S(1 - A) + b_a(T_a - T_i), \quad (3)$$

где Q_S – суммарная солнечная радиация; A – альбедо льда; T_a – температура воздуха (осреднённая на некотором временно́м интервале); b_a – коэффициент турбулентного теплообмена; $\partial/\partial n$ – производная по нормали к поверхности $h_a(x, y, t)$. Для вычисления b_a будем использовать наиболее простую в теплопередаче формулу [8]

$$b_a = 0{,}032(Re_a)^{0,8} \lambda_a/l, \quad (4)$$

здесь Re_a – число Рейнольдса для воздуха; l – линейный размер айсберга.

Б. Граница раздела лёд – пресная вода $h_b(x, y, t)$ (нижняя поверхность айсберга) – это граница фазового перехода. На ней задаётся условие теплового баланса, определяющее её перемещение:

$$T_i = T_W = 0\,^\circ\mathrm{C}, \ [-\lambda\, \partial T/\partial n] = Q_{ph}\rho_i\{1 + (\partial h_b/\partial x)^2 + (\partial h_b/\partial y)^2\}^{-1/2}\partial h_b/\partial t. \quad (5)$$

В уравнении (5) постоянная величина Q_{ph} – теплота фазового перехода лёд–вода.

В. На нижней границе контакта айсберга с морской водой, в случае отсутствия (выклинивания) слоя пресной воды, следует задать условие турбулентного теплообмена типа (5). Это соотношение справедливо при вынужденном перемещении айсберга (буксировании), когда слой пресной воды из-под айсберга быстро удаляется потоком набегающей морской воды:

$$b_s = 0{,}032(Re_s)^{0,8} \lambda_s/l, \quad (6)$$

где $Re_s = w_s l/v_s$ – число Рейнольдса для морской воды; w_s – скорость морской воды в пристеночном пограничном слое; v_s – кинематическая вязкость морской воды.

Формула (5) описывает также абляцию льда на подошве айсберга при его буксировании. Расчёты и оценки по формулам теплопередачи (4) и (6) показывают, что при вынужденном дрейфе (буксировании) скорость абляции льда на подошве айсберга в тёплом океане на порядок выше скорости абляции на его дневной поверхности. В реальности это приводит к скорому образованию нависающих над поверхностью моря длинных выступов льда, которые быстро обламываются, что ещё больше ускоряет процесс уменьшения размеров айсберга. Наиболее оптимальный случай утилизации айсберга – не перемещение его в морской воде, а дрейф вместе с морским течением. В этом случае объём утилизации льда будет максимально возможным.

Таяние айсбергов

В результате таяния льда на боковой поверхности айсберга и на горизонтальных его поверхностях пресная вода накапливается вблизи плавучей льдины и под ней. Этот процесс особенно заметен при плавании пресного льда в тёплой морской воде. Из-за эффекта двойной диффузии (подтверждено экспериментально [9, 10]) пресная талая вода длительное время

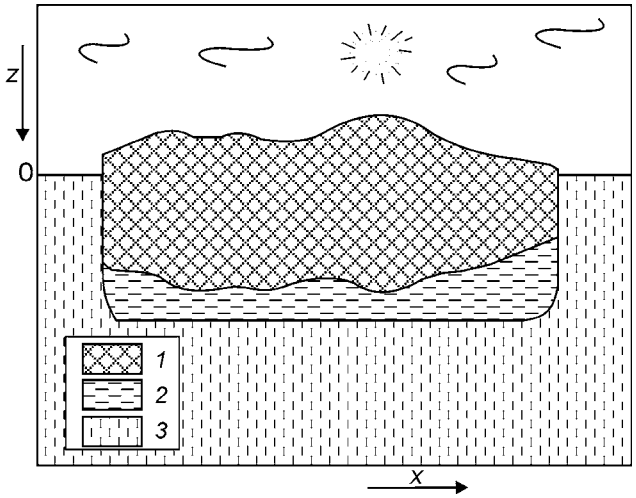

Рис. 1. Плавающий айсберг (разрез по вертикали вблизи условной осевой линии):
1 – пресный лёд айсберга; *2* – слой пресной воды под айсбергом; *3* – морская вода

Fig. 1. Floating iceberg (vertical section near the conditional centerline):
1 – fresh ice of the iceberg; *2* –layer of fresh water under iceberg; *3* – sea water

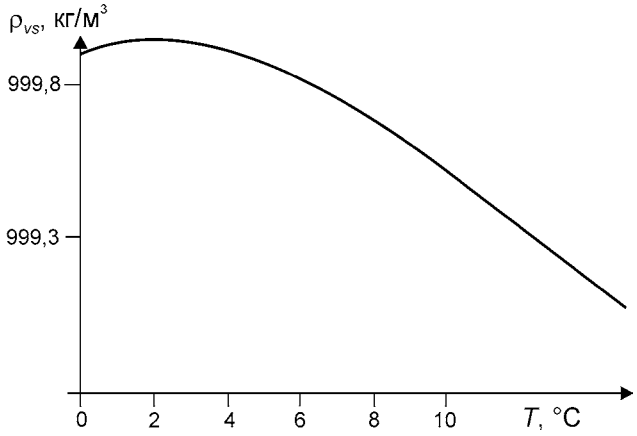

Рис. 2. График функции плотности пресной воды ρ_{vs} от температуры T

Fig. 2. Density of freshwater ρ_{vs} temperature T

не смешивается с тёплой солёной водой моря, более того, между ними существует чёткая граница стратификации по температуре и солёности. Необходимое условие для этого – миграция обломков шельфовых ледников в тёплые моря, омывающие Антарктиду. В этом случае под айсбергами образуется слой пресной воды, фиксируемый инструментальными средствами. Замечено, что в южных широтах Антарктики киты ныряют под айсберги и подолгу остаются в этой пресноводной «подушке»: так они очищаются от прилипших морских моллюсков. Схема вертикального разреза плавания айсберга в морской воде показана на рис. 1.

Результаты подробного теоретического исследования теплофизики айсбергов, гидродинамики и устойчивости слоя пресной воды под ними, теплообмена между айсбергами и окружающей средой приведены в уже упомянутой работе [6]. Установлено, что под айсбергами длительное время существует устойчивая пресноводная «подушка» толщиной в десятки метров. Устойчивость пресного слоя воды между плавающей льдиной и морской водой обусловлена тремя факторами:

Во-первых, градиент температуры пресной воды T_W положителен. Максимум плотности воды в пресном слое под айсбергом достигается при $T_W = 4$ °C (рис. 2). Ниже и выше этой температуры плотность пресной воды убывает (так, в глубоких водоёмах образуется придонный слой воды с температурой 4 °C, не участвующий в тепловом перемешивании);

Во-вторых, при подводном таянии айсберга тёплая морская вода долго не перемешивается с более холодной пресной водой, поскольку диффузионные потоки тепла и соли направлены в противоположные стороны: соль диффундирует вниз, в более нагретую морскую воду, а тепло из солёной воды – вверх, в менее солёную и более холодную пресную воду;

В-третьих, граница раздела между пресной и солёной водой резко выражена и поддерживается процессом двойной диффузии. Согласно инструментальным наблюдениям, под шельфовыми ледниками антарктических морей зафиксированы скачок солёности и чёткая граница двойного отражения радиоволн [11].

Таким образом, под айсбергом образуется резервуар пресной воды объёмом в 30–100 млн м^3, готовой к перекачке в резервуары. Суммирование этих объёмов по доступным для утилизации антарктическим айсбергам может приблизить добычу пресной воды к обозначенной ранее величине – 100 км^3/год (и даже больше). Технологию утилизации айсбергов можно интенсифицировать с относительно небольшими затратами: необходимо покрыть дневную поверхность эксплуатируемого айсберга экологически чистой плёнкой, способной втаи-

вать в лёд, которая предварительно будет специально обработана. Это позволит на порядок увеличить эффективную площадь дневной поверхности льда, что приведёт к росту скорости абляции льда на поверхности айсберга и интенсивности подпитки пресноводной «подушки» под айсбергом. Однако такая мера достаточно опасна в погодных условиях морей, омывающих Антарктиду. Основная идея этого проекта заключается в создании технологии эксплуатации существующих источников пресной воды. Все расходы сводятся только к перекачке воды в танкеры (и даже супертанкеры) и их транспорту в пункты назначения. По сравнению с современными расходами на опреснение воды технология её транспорта в танкерах, в пересчёте на единицу объёма воды, как минимум на порядок дешевле.

Технические возможности утилизации айсбергов

Теоретические аспекты микромасштабного перемешивания в диффузионных процессах проанализированы в работе [12], а перспективы практической утилизации антарктических айсбергов отмечены в работе [13]. Сохранность массива плавучего льда – самый важный вопрос в проблеме утилизации айсбергов. Главная причина разрушения айсбергов – снижение их относительной толщины в результате таяния льда; на это впервые было указано в работе [14]. Уменьшение цилиндрической жёсткости плавающей ледяной плиты обратно пропорционально величине h^3, и это приводит к увеличению её гибкости и возникновению разрушающих напряжений растяжения и изгиба при воздействии морских волн с длиной порядка линейного размера айсберга. Из уравнений равновесия получаем, что горизонтальное и вертикальное напряжения в плавающей плите связаны следующей приближённой зависимостью:

$$\sigma_{xx} \approx \sigma_{zz}/\delta^2, \qquad (7)$$

где $\delta = h/l$ – относительная толщина айсберга; в нашем случае $\sigma_{zz} = (\rho_s - \rho_i)gh_{ws}$, где h_{ws} – высота морских волн.

Тогда из формулы (7) получаем соотношение между растягивающим (изгибным) напряжением, высотой волны с длиной, соизмеримой с размерами айсберга, и разностью плотностей морской воды и пресноводного льда:

$$\sigma_{zz} = (\rho_s - \rho_i)gh_{ws}/\delta^2. \qquad (8)$$

Из формулы (7) следует, что с уменьшением относительной (безразмерной) толщины айсберга δ на 35% растягивающие напряжения в нём возрастут в 2,3 раза. Даже при высоте морской волны 0,5 м для ледяной плиты с $\delta \approx 0{,}1$ напряжение σ_{xx} составит $6{,}5 \cdot 10^5$ Н/м^2. Это приведёт к появлению трещин в теле айсберга, что было зафиксировано радиоэхозондированием [15]. Указанная величина δ – критическая для сохранения плавающего айсберга и даже сравнима с прочностью льда на разрыв [16]. Относительная толщина айсберга $\delta \approx 0{,}1$ критична и в плане воздействия на плавучую льдину окружающей среды, поскольку штормовая погода или сильное волнение на море неизбежно приведут к развалу плавучей льдины на серию более мелких обломков. Этот процесс наблюдается в динамике плавания особо крупных айсбергов с большими размерами в плане: при миграции в зону штормовой погоды они разделяются на мелкие и более устойчивые фрагменты с длительным временем существования. Спектр внешнего резонансного воздействия на плавающую ледяную плиту заметно увеличивается с уменьшением её мощности.

Заметим, что условия устойчивости плавания айсбергов $l \approx h/\delta$ и $B \approx h/\delta$, где l и B – характерные размеры в плане, находятся в противоречии с условием сохранения жёсткости плавучих ледяных плит, при котором безразмерная толщина айсберга δ должна быть порядка единицы, что формально может быть записано в следующем виде: $\delta = 0$ (1).

Это соображение – весомый аргумент против буксирования айсбергов через тёплые океаны на большие расстояния в районы их утилизации. Приведём ряд иллюстраций, полученных по результатам численного моделирования теплообмена айсбергов с окружающей средой (реализация модели (1)–(6)). Сначала рассмотрим варианты с буксированием айсбергов – точка зрения, согласно которой айсберги следует доставлять поближе к пунктам их утилизации, например в Австралию.

На рис. 3 приведены результаты модельных расчётов: динамика размеров айсберга при его вынужденном перемещении со скоростью

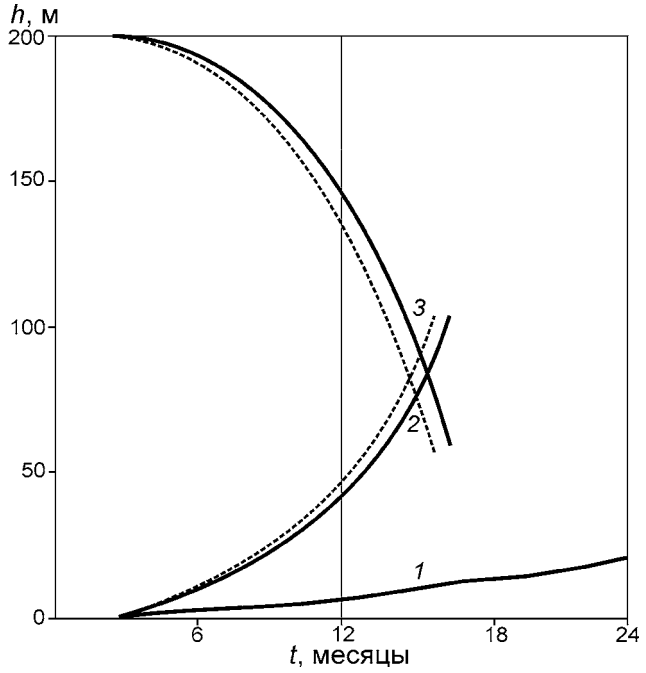

Рис. 3. Расчёты динамики размеров айсберга при его буксировании (исходная мощность плавучей льдины h_0 = 200 м, скорость буксирования w_{tug} = 0,2 м/с):
1 – дневная поверхность айсберга; *2* – нижняя поверхность айсберга; *3* – толщина айсберга; сплошная линия – без учёта изменения средней длины айсберга $l_{ср}$; пунктирная линия – с учётом изменения средней длины айсберга $l_{ср}$

Fig. 3. Numerical simulations of the dynamics of iceberg size during its towing (initial thickness of floating ice h_0 = 200 m, towing speed w_{tug} = 0.2 m/s):
1 – surface of iceberg; *2* – bottom surface of iceberg; *3* – thickness of iceberg; solid line is not taking into account the change of average iceberg length $l_{ср}$; dotted line takes into account changes of average iceberg length $l_{ср}$.

w_{tug} = 0,2 м/с или 720 м/ч (около 17,3 км/сут. или 520 км/мес.). Для достижения Австралии (расстояние $L \approx 4000$ км) потребуется около восьми месяцев гипотетического буксирования. За это время айсберг потеряет от 60 до 140 м толщины при катастрофической потере поперечного размера с боковых поверхностей, а также большом снижении средней длины $l_{ср}$. Расчёты показывают, что потери льда при скорости буксировки w_{tug} = 0,5 м/с (около 43 км/сут.) будут ещё бóльшими. В этом случае за четыре месяца буксирования плавучая льдина потеряет до 70% своего объёма, а её относительная мощность будет уже за критическим значением разрушения $\delta \approx 0{,}1$, согласно оценке (8).

Отметим технические трудности реализации буксирования айсбергов в пункты их утилизации.

1. Велика вероятность, что результаты расчётов термической эрозии льда занижены, поскольку при полной турбулентности в пограничном слое вблизи контакта с твёрдой стенкой теплообмен может существенно увеличиваться.

2. Большая парусность айсберга с мощностью льда h_0 = 200 м (с высотой около 30 м над ур. моря) требует мощных буксировочных средств. Основной фактор здесь – сопротивление воды; необходимая мощность оценивается примерно в 50–150 МВт (см. также [15]).

3. Скорость дрейфа айсбергов при ветровой нагрузке на их надводную часть составляет около 2% скорости воздушного потока. Для преодоления штормовых порывов ветра следует предусмотреть быстрое увеличение буксировочной мощности в 2–3 раза.

4. В штормовую погоду скорость эрозии льда надводной части при воздействии смеси солёной воды и воздуха может увеличиваться на один-два порядка. Вместе с динамикой ударов волн это приведёт к деструкции краевых частей айсбергов, что наблюдается в южных морях Антарктики. Этот фактор снижает число айсбергов, доступных для утилизации. Предложения по тепловой защите утилизируемых айсбергов (типа «одежды» из плёнки) не учитывают трудностей технической осуществимости этого мероприятия в условиях антарктических морей. По мнению Г. Бадера [4], подобные проекты демонстрируют явную однобокость чисто инженерных подходов.

5. Наиболее приемлема технология утилизации с выбором неподвижных айсбергов, уже находящихся в тёплой краевой зоне Антарктики, желательно с минимальной ветровой нагрузкой (без вынужденного перемещения льдины в морской воде).

Отметим, что штормы в омывающих Антарктиду тёплых морях снижают время возможной утилизации айсбергов и могут даже приводить к потере перспективных объектов. Поэтому откачку пресной воды из-под них нужно проводить с максимально допустимыми темпами. Вариант со стационарным нахождением айсберга в тёплой морской воде показан на рис. 4. Здесь будет быстрое стаивание льда на поверхности айсберга (кривая *1*) с естественным пополнением этой талой водой объёма пресноводной «подушки» под айсбергом и увеличением её мощ-

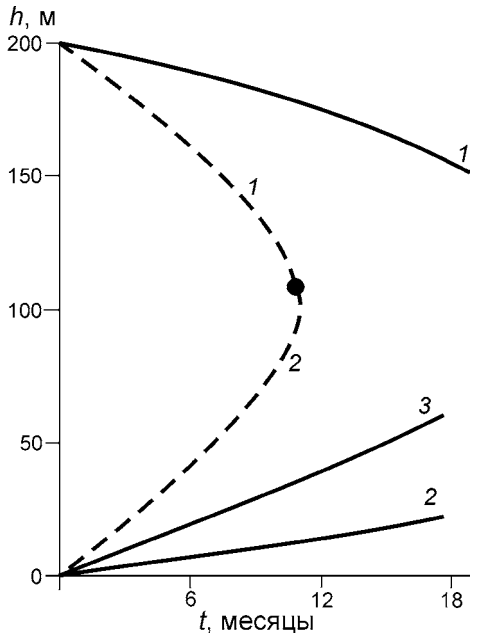

Рис. 4. Расчёты динамики таяния айсберга, неподвижного относительно морской воды (исходная мощность плавучей льдины h_0 = 200 м):
1 – дневная поверхность айсберга; *2* – нижняя поверхность айсберга; *3* – мощность слоя пресной воды под айсбергом; пунктирная линия – таяние айсберга (*1*, *2*) с покрытием, ускоряющим таяние на дневной поверхности айсберга

Fig. 4. Numerical simulations of the melting dynamics of iceberg which is motionless in seawater (initial thickness of floating ice h_0 = 200 m):
1 – surface of the iceberg; *2* – bottom surface of the iceberg; *3* – thickness of fresh water layer under iceberg; the dotted line (*1*, *2*) shows the melting of iceberg with coating, accelerating the melting of iceberg surface

ности (кривая *2*). Толщина айсберга (кривая *3*) быстро снижается, за пять месяцев объём льда уменьшится на 40%.

Опреснение морской и солёной воды

С середины XX в. появились технологии производства пресной воды. Прежде всего это – опреснение морской воды или солёной воды из подземных источников. Выработка пресной воды в мире растёт непрерывно и высокими темпами. Если в 1960 г. объём опреснения составил 0,09 км^3, то в 1985 г. уже получали 7,5 км^3, однако сегодня эта цифра равна только 15,3 км^3. Основная проблема в том, что способы опреснения воды очень энергоёмкие и дорогостоящие. Сегодня суммарный объём опресняемой воды близок к своему технологическому пределу. Распределение количества опреснённой воды по регионам неравномерно: на Средний Восток приходится 60%, Северную Америку – 13%, Европу – 10%, Африку – 7%, на остальной мир – 10%. На страны СНГ приходится всего 0,6% общего объёма выработки опреснённой в мире воды. Соглашения по транспортировке воды заключены между Турцией и Израилем, Белоруссией и Объединёнными Арабскими Эмиратами, Киргизией и Германией. Договор между Турцией и Израилем заключён на 20 лет на доставку по морю 50 млн м^3 воды (50 млн т) ежегодно по цене 0,7 дол./м^3 воды. Объёмы других подобных контрактов измеряются сотнями миллионов долларов.

Природный феномен стратифицированных пресно-солёных водоёмов

Глубоководный водоём этого типа – озеро Ванда, находящееся в 150 км от базы Скотта (77°35' ю.ш. и 161°39' в.д.) в нижней части депрессии Райт Драй Уэйли (Земля королевы Виктории) в Антарктиде. Размеры озера таковы: длина – 7,4 км, ширина – 1,85 км, средняя глубина – около 65–70 м. Детальные исследования позволили установить тепловой режим и химический состав воды этого озера [17–20]. Круглогодично оно покрыто гладким ледяным покровом толщиной около 4 м с высокой прозрачностью (постоянные ветры, характерные для антарктических оазисов, удаляют снег и полируют поверхность льда). Среднегодовая температура воздуха −20 °С. Суммарная радиация региона 3,8·10^6 кДж/(м^2·год), вся она приходится на весенне-летний сезон (полярный день). Согласно измерениям, около 6% её проникает в воду через ледяной покров. Радиационный баланс подстилающей поверхности за год в среднем составляет 24 Вт/м^2: летом озеро получает тепло, а зимой его теряет, но в целом баланс тепла для водоёма – положительный. Измерения теплового режима воды и её характеристик позволили выявить удивительный феномен пресно-солёных озёр, который не был известен ранее ни для одного озера мира.

Подо льдом, до глубины 10–14 м, температура воды резко возрастает от 0 до +8 °С. В пре-

делах этого слоя установлено четыре конвективных слоя. Далее, до глубины примерно 38 м, температура воды почти не меняется. Наличие областей с сильной конвекцией обусловливает гомотермию: в этом диапазоне глубин температура воды медленно возрастает до +10 °С. Анализ химического состава и плотности воды показал, что до глубины примерно 48 м вода имеет постоянный состав и почти не содержит примесей, однако ниже этого уровня солёность и плотность воды резко возрастают. В придонном слое плотность воды достигает 1100 кг/м^3, что соответствует необычайно высокой концентрации соли (около 150 г/л). Устойчивая в поле силы тяжести стратификация воды в оз. Ванда обусловливает отсутствие конвекции в придонной области ниже 48 м. Граница между пресной и солёной водой чётко выражена и не размыта, ниже неё отмечена высокая оптическая плотность воды. Температура воды в придонном слое возрастает и достигает +25 °С на дне. Слой пресной воды в пределах глубин 4–48 м в оз. Ванда – это готовый запас пресной питьевой воды, пригодной к употреблению, объём которого оценивается приблизительно в 600 млн м^3.

Тепловой запас озёр антарктических оазисов достаточно велик, поэтому они характеризуются значительной инерционностью по отношению к сезонным колебаниям температуры воздуха и солнечной радиации и служат индикаторами длиннопериодных климатических колебаний. Резкая граница раздела в придонном слое воды получила своё объяснение в рамках механизма двойной диффузии, исследованного Дж. Тернером (см. [13]): соль устремляется в зону своей повышенной растворимости (высокой температуры), а оттуда поступает поток кондуктивного тепла. Верхний слой воды озера подо льдом от 10 до 12 м содержит всего 10% теплозапаса водоёма, слой гомотермии в диапазоне глубин от 4 до 48 м – около 50%, ниже стратифицированной границы раздела (в придонной зоне от 48 до 66–70 м по глубине) – около 40%.

В рамках параметризованной стационарной математической модели стратифицированного пресно-солёного водоёма с масштабами оз. Ванда установлено, что единственно приемлемый источник нагрева воды – солнечная радиация. В модели подобраны основные теплофизические характеристики озера, оптические

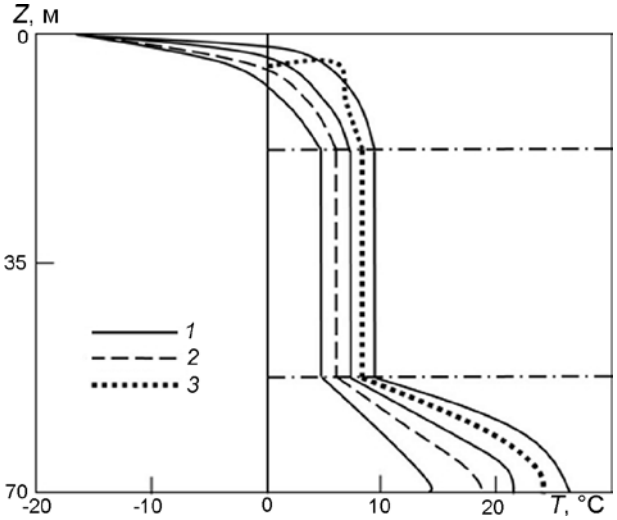

Рис. 5. Зависимость стационарной температуры от глубины озера Ванда:
1, *2* – модельные расчёты для двух разных вариантов значений солнечной радиации (внешней среды) и оптических характеристик светорассеивающей внутренней среды; *3* – измерения температуры воздуха [20]

Fig. 5. Stationary temperature depth of Lake Vanda:
1, *2* – are numerical simulations for two different variants of values solar radiation flux (external medium) and optical characteristics of the light-scattering internal medium; *3* – measured temperature of the lake [20]

параметры воды и распределение по глубине функции тепловыделения таким образом, чтобы они максимально соответствовали измеренным значениям температуры воды озера.

На рис. 5 приведены расчётные температурные кривые для оз. Ванда для нескольких значений потока солнечной радиации Q_0. Их графики левее прямой $T = 0$ °С (на вертикальной оси Oz), в пределах глубины от 0 до 4 м описывают температуру ледяного покрова озера, которая рассчитывалась по стационарной краевой задаче для уравнения теплопроводности (1) с условием теплообмена на дневной поверхности льда (3). Справа от прямой $T = 0$ °С кривые характеризуют температуру воды в озере. Расчётные графики единообразны по своей форме. Для области пресной воды $z_1 < z < z_2$ (горизонтальный штрих-пунктир на рис. 5) подбирались параметры направленного вниз тепломассопереноса, устанавливающего в ней полную гомотермию. Ниже и выше слоя гомотермии теплопередача в воде озера обусловлена только кондуктивным механизмом теплопроводности, что приводит к значительным температурным градиентам в

пресной воде подо льдом и в солёной воде придонной области (решение уравнения теплопроводности (1) с подбором функций объёмного тепловыделения). Слой пресной воды в пределах 12–38 м – это природный источник пресной питьевой воды, пригодной к употреблению; его объём в оз. Ванда оценивается около 600 млн м^3. Установлено, что 20% проходящего в воду потока солнечной радиации Q_0 достигает тёмного дна и «застревает» в нём, поддерживая придонный температурный максимум.

Вопрос о происхождении оз. Ванда остаётся открытым. Не исключено, что оно – реликт морского залива. Использование природного феномена этого озера перспективно для получения питьевой воды в промышленных объёмах в будущем. Вероятно, аналогичный комплекс теплофизических условий можно создать в искусственных водоёмах на участках морского побережья, испытывающих дефицит пресной и питьевой воды.

Заключение

В качестве потенциальных источников пресной воды предлагается доступная технология её производства. Детально рассмотрены теоретическое обоснование и анализ технических возможностей восполнения дефицита пресной воды путём утилизации антарктических айсбергов. Предлагаемая технология – экологически чистая и может вызвать лишь незначительные изменения экологического равновесия в окружающей среде в рамках природных колебаний.

Благодарности. Автор признателен академику В.М. Котлякову за ценные замечания по структуре и содержанию статьи, а также рецензентам за качественную работу со статьёй.

Acknowledgments. Author is grateful to academician V.M. Kotlyakov for valuable comments on the structure and content of the paper and to the referees for a quality job with the paper.

Литература

1. *Берёзкин М.Ю., Залиханов А.М., Синюгин О.А., Соловьев А.А., Чекарев К.В.* Ресурсы конденсационной воды в естественных условиях // Процессы в геосредах. 2016. Т. 5. № 1. С. 12–17.
2. *Березкин М.Ю.* Процессы в геосредах. http://www.aquaexpert.ru/
3. *Бобылев С.Н., Ходжаев А.Ш.* Экономика природопользования. М.: ИНФРА-М, 2004. 501 с.
4. *Bader H.* A critical look at the iceberg utilization project // Iceberg utilization / Ed. A.A. Husseiny. Pergamon press, UK, 1977. P. 34–44.
5. *Назаров В.С.* Лед антарктических вод (Результаты исследований по программе Международного геофизического года) // Океанология. 1962. Т. 10. № 6. 79 с.
6. *Красс М.С.* Термомеханика айсбергов // Антарктика. Вып. 26. М.: Наука, 1987. С. 130–147.
7. *Красс М.С., Мерзликин В.Г.* Радиационная теплофизика снега и льда. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 262 с.
8. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 343 с.
9. *Huppert H.E., Turner J.S.* On melting icebergs // Nature. 1978. V. 271. № 5640. P. 46–48.
10. *Huppert H.E., Turner J.S.* Iceblocks melting into a salinity gradient // Journ. of Fluid Mechanics. 1980. V. 100. № 2. P. 367–384.
11. *Neshiba S.* Upwelling by icebergs // Nature. 1977. V. 267. № 5611. P. 507–508.

References

1. *Beryozkin M.Yu., Zalikhanov A.M., Sinyugin O.A., Soloviev A.A., Chekarev K.V.* Resources of condensed water under natural conditions. *Protsessy v geosredakh.* Processes in Geomedia. 2016, 5 (1): 12–17. [In Russian].
2. http://www.aquaexpert.ru/ *Berjozkin M.Ju. Protsessy v geosredakh.* Processes in Geomedia.
3. *Bobylev S.N., Khodzhaev A.S. Ekonomika prirodopol'zovaniya.* Environmental Economics. Moscow: INFRA-M, 2004: 501 p. [In Russian].
4. *Bader H.* A critical look at the iceberg utilization project. Iceberg utilization. Ed. A.A. Husseiny. Pergamon Press, UK, 1977: 34–44.
5. *Nazarov V.S.* Ice of Antarctic Water. (Results of researches on the international geophysical year). *Okeanologiya.* Oceanology, 1962, 10 (6): 79 p. [In Russian].
6. *Krass M.S.* Thermomechanics of icebergs. *Antarktika.* Antarctic, 26. Moscow: Nauka, 1987: 130–147. [In Russian].
7. *Krass M.S., Merzlikin V.G. Radiatsionnaya teplofizika snega i l'da.* The radiative thermophysics of snow and ice. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990: 262 p. [In Russian].
8. *Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Osnovy teploperedachi.* Fundamentals of heat transfer. Moscow: Energiya, 1977: 343 p. [In Russian].
9. *Huppert H.E., Turner J.S.* On melting icebergs. Nature. 1978, 271 (5640): 46–48.
10. *Huppert H.E., Turner J.S.* Iceblocks melting into a salinity gradient. Journ. of Fluid Mechanics. 1980, 100 (2): 367–384.

12. *Turner J.S.* Small-scale mixing processes // Evolution of physical oceanography / Ed. B. Barren and C. Winch. The MIT Press, 1979. P. 236–262.
13. *Weeks W.F., Campbell W.J.* Icebergs as a fresh water source: an appraisal // Journ. of Glaciology. 1973. V. 12. № 65. P. 207–223.
14. *Weeks W.F., Mellor M.* Some elements of iceberg utilization // Iceberg utilization / Ed. A.A. Husseiny. Pergamon press, UK, 1977. P. 45–98.
15. *Kovach A.* Iceberg thickness and crack detection // Iceberg utilization / Ed. A.A. Husseiny. Pergamon press, UK 1977. P. 131–141.
16. *Шумский П.А.* Динамическая гляциология. Итоги науки. Сер. География. Гидрология суши. Вып. 1. 1968. 172 с.
17. *Красс М.С.* Теплофизика стратифицированных пресно-соленых озер Антарктических оазисов // Антарктика. 1988. Вып. 27. С. 76–89.
18. *Hoare R.A.* Problems of heat transfer in lake Vanda, a density stratified Antarctic lake // Nature. 1966. V. 210. № 5038. P. 787–789.
19. *Hoare R.A.* Thermohaline convection in Lake Vanda: Antarctica // Journ. of Geophys. Research. 1968. V. 7. № 2. P. 607–612.
20. *Wilson A.T., Wellman H.W.* Lake Vanda: an Antarctic Lake // Nature. 1962. V. 196. № 4680. P. 1171–1173.

11. *Neshiba S.* Upwelling by icebergs. Nature. 1977, 267 (5611): 507–508.
12. *Turner J.S.* Small-scale mixing processes. Evolution of physical oceanography. Eds. B. Barren, C. Winch. The MIT Press, 1979: 236–262.
13. *Weeks W.F., Campbell W.J.* Icebergs as a fresh water source: an appraisal. Journ. of Glaciology. 1973, 12 (65): 207–223.
14. *Weeks W.F., Mellior M.* Some elements of iceberg utilization. Iceberg utilization. Ed. A.A. Husseiny. Pergamon press, UK, 1977: 45–98.
15. *Kovach A.* Iceberg thickness and crack detection. Iceberg utilization. Ed. A.A. Husseiny. Pergamon press, UK, 1977: 131–141.
16. *Shumsky P.A. Dinamicheskaya glyatsiologiya. Itogi nauki.* Dynamic Glaciology. The results of science. Ser. Geography. Moscow: VINITI, 1968: 172 p. [In Russian].
17. *Krass M.S.* Thermophysics of stratified freshwater – salt lakes of Antarctica. *Antarktika*. Antarctic. 1988, 27: 76–89. [In Russian].
18. *Hoare R.A.* Problems of heat transfer in lake Vanda, a density stratified Antarctic lake. Nature. 1966, 210 (5038): 787–789 .
19. *Hoare R.A.* Thermohaline Convection in Lake Vanda: Antarctica. Journ. of Geophys. Research. 1968. 7 (2): 607–612.
20. *Wilson A.T., Wellman H.W.* Lake Vanda: an Antarctic Lake. Nature. 1962, 196 (4680): 1171–1173.