

## Гидротехническое строительство

УДК 502/504:556.535.5:627.5

**А. В. БАГИН, Д. В. КОЗЛОВ**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет природообустройства»

### **ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕДОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ИЗ ГАБИОНОВ**

*Предложен вариант обобщенной математической модели, позволяющей проанализировать факторы воздействия ледовых полей на берегоукрепительные и гидротехнические сооружения, выполненные с использованием габионных технологий и эксплуатирующиеся в условиях развивающихся ледовых нагрузок. Приведен алгоритм программы реализации задачи в программном комплексе Statistica с использованием безразмерных комплексов. Получены зависимости величины внедрения сооружения габионов в структуру ледяных образований от характеристик льда и размеров (протяженности) сооружения.*

*Ледовые образования, сооружение из габионов, величина ледовой нагрузки, воздействие на сооружение, внедрение сооружения в торос, планирование эксперимента, экстремальная нагрузка.*

*There is proposed a variant of the generalized mathematical model allowing analyzing factors of ice fields action on coast protecting and hydraulic structures fulfilled with usage of gabion technologies and which are exploited under the conditions of developing ice loads. There is given an algorithm of the task realization program in the software package Statistica using dimensionless groups. Dependences are received of the value of mesh structures penetration into the structure of ice formations depending on ice characteristics and dimensions (length) of the structure.*

*Ice formations, hydraulic mesh structure, ice load value, action on the structure, structure penetration into the hummock, planning of the experiment, extreme loading.*

Проблема определения ледовых нагрузок на морские и речные ГТС усложняется, во-первых, из-за влияния на ледовые нагрузки природных факторов, во-вторых, из-за случайного характера и широкого диапазона изменчивости этих факторов, в частности ледовых нагрузок, в-третьих, из-за циклического характера ледовых нагрузок, в-четвертых, из-за большого разнообразия форм ледяного покрова и расчетных случаев их воздействия на сооружения [1].

При проектировании берегоукрепительных сооружений с применением габионных конструкций необходимо учитывать возможность воздействия на нихдвигающихся ледовых полей, нагрузки от которых могут быть экстремальными, а также возможность воздействия статических нагрузок, возникающих при навалах льда на откосы [2, 3].

Анализируя опубликованные материалы о моделях воздействия ледяных образований на сооружения вертикального

профиля, можно сказать, что в основном такие образования базируются на гипотезе полного разрушения льда при взаимодействии с сооружением [4]. Но при реальном взаимодействии полное разрушение ледяного поля, видимо, может произойти только в исключительном случае. В процессе моделирования, с учетом скорости дрейфа льда, предоставляется возможность дифференцировать нагрузки от льда по кинетической энергии, определить ее значение и глубину максимального внедрения сооружения в лед [5].

Максимальное внедрение сооружения в лед  $X_{\max}$  в каждом случае имеет характерную зависимость от размеров ледяного поля, массы, свойств и начальной скорости дрейфа. Максимальное внедрение может быть определено из балансового энергетического соотношения [5, 6]:

$$\frac{M_T v^2}{2} = \int_0^{x_{\max}} F_{\text{ice}} dx, \quad (1)$$

где  $M_T$  – масса ледяного поля, т;  $v$  – скорость дрейфа ледяного образования, м/с;  $F_{\text{ice}}$  – нагрузка от ледяного поля, кН;  $X_{\max}$  – максимальное возможное внедрение ледяного поля, м.

В связи со сложностью определения функции (1) величину  $X_{\max}$  можно определить в численной реализации модели взаимодействия.

Величина ледовой нагрузки, воздействующей на берегоукрепительное сооружение, прежде всего будет зависеть от геометрических параметров ледяного образования, степени смерзания в точках контакта обломков, слагающих образование (т.е. прочности его структурных связей), скорости его движения. Если возникают максимально возможные силы сцепления (смерзания) обломков образования, прочность его будет максимальной, т.е. это и есть расчетный случай [7].

Для определения пассивного сопротивления обычно принимают расчетную модель предельного равновесия грунта, решения теории предельного равновесия или различного рода приближенные решения, основанные на этой модели. По мере прорезания берегоукрепительным сооружением поля льда в этом скоплении образуется ограниченный, примыкающий к поверхности габиона уплотненный объем в виде призмы выпора из упорядоченно ориентированных обломков льда,

сдвигающийся далее по образовавшимся поверхностям скольжения. При перемещении возникают силы сопротивления сдвигу, препятствующие выпору.

В результате по лицевой стенке (грани) сооружения возникает все увеличивающаяся реакция обломков льда, которая к моменту выпора всей призмы достигает максимальной величины. Эта реакция носит название пассивного сопротивления, или отпора. Данный физический процесс аналогичен процессу деформации сыпучей среды.

Нагрузку  $F_{\text{ice}}$  определяют по формуле [8]:

$$F_{\text{ice}} = F_{b,p} = m k_b k_v R_c D h_c, \quad (2)$$

где  $m$  – коэффициент формы конструкции в плане, определяемый по табл. 29 [8];  $k_b$  – коэффициент смятия, принимаемый по табл. 30 [8];  $k_v$  – коэффициент скорости, принимаемый по табл. 31 [8];  $R_c$  – прочность консолидированной части при сжатии, МПа;  $D$  – ширина сооружения по урезу воздействия льда, м;  $h_c$  – расчетная толщина консолидированной части, м.

Исследование воздействия ледовых образований на берегоукрепительные сооружения из габионов заключается в определении степени влияния изменений параметров льда на величину максимальных значений ледовых нагрузок, воздействующих на сооружение. Объем информации о ледовой обстановке и ее изменчивости в месте возведения сооружения можно использовать для определения экстремальных ледовых нагрузок, действующих на сооружение из габионов. Например, часть данных по кинематическим, морфологическим и физико-механическим свойствам однолетних торосов, дрейфующих в районе побережья острова Сахалин, были предоставлены институтом «СахалинНИПИморнефть». Часть информации о характеристиках ледяных образований взята из [9].

Для исследования функционирования разработанной модели по определению ледовых нагрузок от ледовых образований, воздействующих на сооружения, было выполнено численное моделирование. На основе теоретической модели формирования экстремальной ледовой нагрузки от ледового поля рассмотрены три расчетных случая взаимодействия однолетнего торосистого образования с сооружением из габионов вертикального профиля. Исследование модели заключалось в выявлении степени влияния различных параметров

ледовых образований на величину ледовой нагрузки, ими создаваемой.

По результатам расчета ледовой нагрузки от ледяного поля  $F_{\text{ridge}}$  был построен график зависимости величины нагрузки от протяженности (ширины или диаметра) сооружения (рис. 1). На графике приведены кривые изменения нагрузок от воздействия ледовых полей на сооружение, рассчитанные по различным методикам [4]. Полученные значения нагрузок меньше тех, которые рассчитаны по опубликованным моделям других авторов. Это во многом объясняется принятой большинством авторов моделей гипотезы о полном разрушении тороса, а также малой глубиной внедрения берегозащитного сооружения из габионов в лед (в исследуемой модели), при которой ледовая нагрузка значительно меньше, чем при полном разрушении ледового образования о сооружение.

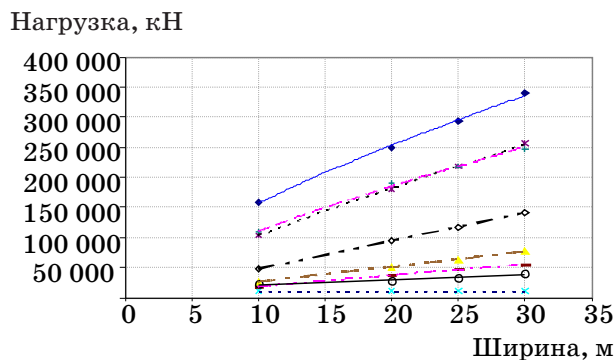


Рис. 1. Расчет нагрузок от воздействия ледяных образований на подпорную стену из габионов вертикального профиля: ◆ Мааттанен; ▲ Меллор; × Хойканен; ✱ СНиП; — Кросдейл; + Комарова; ◇ Эранти; ○ Бланшет

Поскольку основными факторами, влияющими на величину экстремальной ледовой нагрузки, являются геометрические и прочностные параметры, скорость дрейфа ледяного образования, а также форма и размеры сооружения, то наибольший интерес представляет исследование сочетания различных значений данных характеристик ледяного образования и сооружения.

Для исследования возможных значений величин ледовой нагрузки от ледовых полей и глубины внедрения сооружения из габионов в ледовое образование был разработан план эксперимента и выполнены необходимые численные расчеты.

Планирование эксперимента состоит из несколько этапов: выбор значений параметров для выполнения расчета на ЭВМ; определение способов образования статистических выборок; расчет необходимого числа повторений экспериментов.

Поскольку в большинстве экспериментов ставится задача исследования влияния множества начальных параметров на величину выходных, можно допустить вариации одного из этих параметров во всевозможных сочетаниях с другими, принимаемыми постоянными, или же использовать методы факторного анализа.

Функцию ледовой нагрузки от характеристик ледовых полей, воздействующих на берегозащитное сооружение  $F_{\text{ridge}}$ , можно представить в виде функции, зависящей от ряда параметров:

$$F_{\text{ridge}} = f(h_s, R_c, v_t, \rho_l, D_c), \quad (3)$$

где  $F_{\text{ridge}}$  – нагрузка от ледяного покрова, Н ( $\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ );  $h_s$  – высота надводной части тороса, м;  $R_c$  – прочность средней (консолидированной) части льда, МПа ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ );  $v_t$  – скорость дрейфа тороса,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\rho_l$  – плотность льда,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $D_c$  – ширина (протяженность) сооружения, м.

Выбор данных параметров обусловлен их наибольшим влиянием на формирование ледовой нагрузки от рассматриваемого ледяного образования.

Согласно [5], зависимость (3) на основе анализа размерностей можно представить в виде зависимости между безразмерными величинами:

$$Y = \varphi[X_1; X_2]. \quad (4)$$

Безразмерные величины определяются следующими соотношениями:

$$X_1 = \frac{h_s}{D_c}; X_2 = \frac{R_c}{v^2 \rho_l}; Y = \frac{F_{\text{ridge}}}{D_c^2 v^2 \rho_l}. \quad (5)$$

Вместо поочередного изменения из пяти переменных функции (1) можно изменять любую из двух независимых переменных (5), что позволяет не только упростить эксперимент, но и дает возможность с большей точностью проанализировать данные.

Определившись с количеством переменных, переходим к планированию эксперимента. Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется полнофакторным. В нем каждый фактор (переменная)

имеет свои границы варьирования:  $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$ . Кроме абсолютных значений факторов, в планировании эксперимента применяются так называемые кодировочные уровни: «+1» – верхний уровень (соответствует максимальной величине данного фактора), «0» – нулевой уровень (соответствует среднему значению фактора) и «-1» – нижний уровень (ему соответствует минимальное значение данного фактора). Выбираем определенное число уровней по каждому фактору и выполняем все возмож-

ные их комбинации. Для проведения планирования эксперимента назначаем уровни факторов, согласно (3), верхний, нижний и нулевой.

С помощью подпрограммы «Планирование эксперимента» прикладного пакета Statistica был подготовлен план эксперимента. В виде комбинаций уровней факторов он представлен в табл. 1. Численные значения переменных, необходимых для расчета факторов по формулам (4) для условий шельфа острова Сахалин, даны в табл. 2.

Таблица 1

План эксперимента в виде комбинаций кодировочных уровней

№ эксперимента	Комбинация кодировочных уровней независимых факторов	
	$X_1$	$X_2$
1	1	-1
2	-1	-1
3	-1	0
4	-1	1
5	0	-1
6	0	0
7	0	1
8	1	0
9	1	1

Таблица 2

Численные характеристики параметров ледяного образования и сооружения

Параметр	Минимальное значение (min)	Среднее значение (ave)	Максимальное значение (max)
$h_s$ , м	0,125	1,473	4,505
$R_c$ , МПа	0,01	2,55	4,0
$V$ , м/с	0,01	0,18	1,1
$D$ , м	10,0	55,0	100,0

По данным табл. 3 построена поверхность отклика – поверхность зависимости ледовой нагрузки, воздействующей на ГТС, от основных параметров ледяного образования и сооружения, слагающих ее (рис. 2). При помощи подпрограммы «Планирование эксперимента» были определены коэффициенты уравнения полиномиальной модели:

$$\begin{aligned}
 Y = & -2,6380345 - 8,702579 \left( \frac{h_s}{D_c} \right) + \\
 & + 1852,693323 \left( \frac{h_s}{D_c} \right)^2 + \\
 & + 1,79735 \cdot 10^{-5} \left( \frac{R_c}{v^2 \rho_1} \right) + \\
 & + 3,35111 \cdot 10^{-9} \left( \frac{R_c}{v^2 \rho_1} \right)^2.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Нагрузка, кН

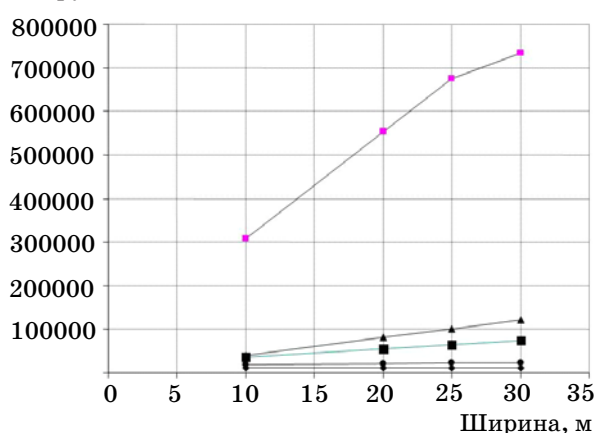


Рис. 2. Нагрузка от воздействия однолетних торосов на сооружения откосного профиля: ◆ 2F; ▲ API.F; ● СНиП; ■ Хойкканен; ■ Joensun

**Комбинации переменных для каждого уровня в соответствии с планом эксперимента**

№ пп.	$h_s$	$D_c$	$R$	$v$
1	max	min	min	max
2	min	max	min	max
3	min	max	ave	min
4	min	max	max	min
5	max	ave	min	max
6	max	ave	ave	min
7	max	ave	max	min
8	max	min	ave	min
9	max	min	max	min

На основе анализа размерностей можно исследовать зависимость величины внедрения сооружения в торос  $X_{max}$  от параметров торосистого образования и сооружения с учетом взаимозависимости геометрических параметров согласно принятой модели ледового поля. Данную зависимость можно записать в виде функции:

$$X_{max} = f(F_{ridge}, v_t, D_c). \quad (7)$$

Поскольку ледовая нагрузка зависит от нескольких параметров, то зависимость (5) можно выразить через безразмерные комбинации следующих величин:

$$\frac{X_{max}}{D_c} = f\left[\frac{h_s}{D_c}; \frac{R_c}{v^2 \rho_1}\right]. \quad (8)$$

Обозначим полученные безразмерные комплексы так:

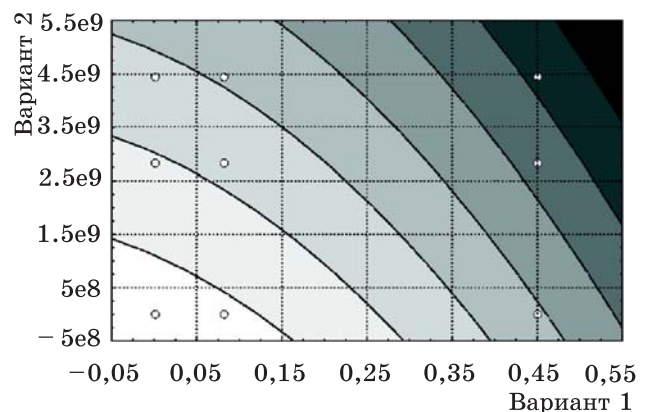
$$X_1 = \frac{h_s}{D_c}; X_2 = \frac{R_c}{v^2 \rho_1}; Y = \frac{X_{max}}{D_c}. \quad (9)$$

Величина ледовых нагрузок на габионы определяется по специальному алгоритму и программе моделирования воздействия ледовых полей, разработанной на VBA для Windows 2000/XP. Программа составлена в соответствии с алгоритмом вероятностного моделирования.

По исходным данным, в соответствии с планом численного эксперимента, с помощью разработанной программы были рассчитаны факторы. Их численные значения приведены в табл. 4, по данным которой, при помощи пакета Statistica, были построены поверхности отклика, позволяющие более детально исследовать

зависимость величины внедрения сооружения из габионов в ледовое поле от основных характеристик ледяного образования и сооружения (зависимость  $Y$  от  $X_1$  и  $X_2$ ) (рис. 3 и 4). После обработки в программе Statistica было получено следующее уравнение модели:

$$Y = 0,088847 + 0,205231\left(\frac{h_s}{D_c}\right) + 0,119823\left(\frac{h_s}{D_c}\right)^2 - 0,000008\left(\frac{R_c}{v^2 \rho_1}\right) + 1,059 \cdot 10^{-11}\left(\frac{R_c}{v^2 \rho_1}\right)^2. \quad (10)$$



**Рис. 3. Зависимость величины нагрузки ледового поля, воздействующего на сооружение из габионов от параметров ледового поля и площади контакта:** □ 1169,03; □ 525,72; □ 2220,476; □ 3915,23; □ 5609,9865; ■ 7304,74; ■ 8999,5; ■ above

Численные значения безразмерных коэффициентов

№ эксперимента	Безразмерные комплексы			
	Независимые		Зависимые	
	X1	X2	Y [для (6)]	Y [для (10)]
1	0,0901	3,08642	2,307073	0,348371
2	0,01	3,08642	0,070345	0,000525
3	0,01	28333,33	0,555979	2,383106
4	0,01	44444,44	0,872111	2,382106
5	0,04505	3,08642	0,173465	0,052291
6	0,04505	28333,33	0,037227	0,000156
7	0,04505	44444,44	5,839497	0,000156
8	0,0901	28333,33	11,55585	0,000856
9	0,0901	44444,44	18,09402	0,000856

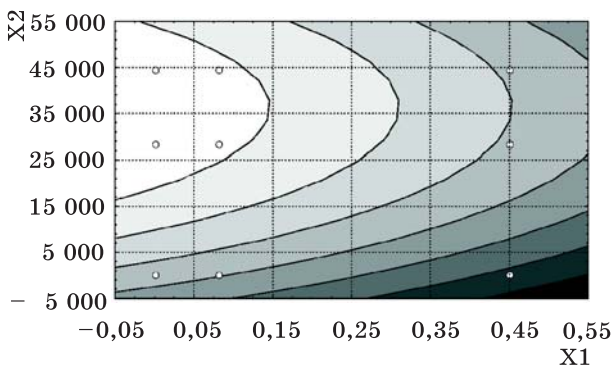


Рис. 4. Зависимость величины внедрения габиона в структуру ледового поля ( $DX$ ) от характеристик ледового образования и размеров (площадных) сооружения:  
 □ 0,019; □ 0,024; □ 0,066; □ 0,109; □ 0,152;  
 ■ 0,194; ■ 0,237; ■ above

Анализируя формулу (9) и график на рис. 2, можно сказать, что геометрические размеры ледового образования и ширина сооружения в зоне контакта оказывают большее влияние на величину внедрения конструкции в ледовый покров по сравнению с прочностью консолидированной части ледяного образования. Кроме того, согласно полученной поверхности отклика, максимально возможное внедрение конструкции из габионов в ледовое поле при заданных условиях (см. табл. 2) составит не более  $0,237D$  (см. рис. 3). На основании этого можно сделать следующий вывод: полного разрушения ледового поля, взаимодействующего с сооружением, даже при самых неблагоприятных параметрах, как было в большинстве предыдущих моделей взаимодействия [4], не происходит.

Таким образом, при взаимодействии дрейфующих льдов с берегозащитными

сооружениями, в том числе сооружениями из габионов, кинетической энергии для полного разрушения тела тороса и формирования максимальной нагрузки недостаточно.

Рассматривая возможность того, что на ледовое поле после его остановки у сооружения могут воздействовать другие дрейфующие ледяные образования, важно отметить, что вероятность возникновения данных ситуаций зависит от многих факторов и их природа различна. Для изучения и оценки возможности появления такой ситуации необходимо построить имитационную модель, описывающую процессы, происходящие при этом.

В случае подхода поля ровного льда с «предельными характеристиками» к остановившемуся у сооружения ледовому полю схему их взаимодействия можно описать в рамках существующего действующего нормативного документа. В [8] рассматриваются два основных применительных случая: сооружение прорезает поле или поле ровного льда останавливается при внедрении в него элементов сооружения. В обоих вариантах, если сила воздействия ледяного поля на сооружение превышает величину воздействия ледяного образования на габион, возможно дальнейшее внедрение сооружения в ледовое поле.

В результате выполненного численного расчета были получены значения нагрузки от ровного поля, воздействующего на остановившееся у сооружения из габионов ледовое поле торосистого типа (рис. 1, 2). Однако полученные в данном случае значения можно считать верхней границей экстремальных ледовых нагрузок, так как внешних воздействий для полного разрушения ледового поля недостаточно.

Учитывая случайную природу ледовых нагрузок, для определения степени воздействия на сооружение ледяных образований необходимо рассмотреть все возможные варианты взаимодействия элементов системы «сооружение – дрейфующий ледяной покров». Это позволит произвести вероятностное моделирование данных процессов и получить вероятностное распределение экстремальных нагрузок от дрейфующих ледяных образований.

### Выводы

В результате компьютерного моделирования оценки воздействия ледяных полей на сооружения из габионных конструкций были получены зависимости, позволяющие оценить характер воздействия льда на сооружения в целом, а также ключевые параметры, которые необходимо учитывать при проектировании гидротехнических сооружений в условиях развивающейся ледовой нагрузки. Полученные поверхности отклика показывают зависимость величины внедрения гидротехнических сооружений из габионов в ледовые образования. Полученные при этом результаты необходимо трактовать как «первое приближение» к реальной ситуации взаимодействия льда и сооружений, так как ледовые нагрузки носят случайный характер, а погрешности, связанные с неправильной оценкой их вероятностных характеристик, во многих случаях могут значительно превышать погрешности физических и механических моделей льда и его воздействий на гидротехнические сооружения.

1. **Беккер А. Т.** Вероятностные характеристики ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа. – Владивосток: Изд-во «Дальнаука». – 2005. – 211 с.

2. **ВСН-АПК 2.30.05.001–03.** Мелиорация. Руководство по защите земель, нарушенных водной эрозией. Габионные конструкции противоэрозионных сооружений. – М.: Минсельхоз РФ, 2003. – 24 с.

3. **ГОСТ Р 52132–2003.** Изделия из сетки проволочной крученой с шестиугольными ячейками для габионных конструкций: технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 15 с.

4. **Timco G. W., Sayed M.** Overview of ice loads on Arctic structures. – Institute for Engineering in the Canadian Environment Technical Report, 1994. – 114 p.

5. **Хейсин Д. Е., Андреев Р. Л.** Вероятностный подход к определению ледовых нагрузок на сооружения / Исследование влияния сооружений гидротехнических узлов на ледовый и термический режимы рек и окружающую среду: Материалы конференций и совещаний по гидротехнике «Лед-89». – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 115–119.

6. **Бекецкий С. П.** Морфологические и прочностные параметры торосистых образований Охотского моря: автореф. дис. ... канд. географ. наук. – СПб, 1996.

7. **Beketsky S. P., Astafiev V. N. and Bogdanchikov S. M.** Technique of Determination of Design Parameters of Hummocks: Proc. of the 16th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic engineering and the 14th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. – 1997. – Vol. IV. – P. 239–244.

8. **СНиП 2.06.04–82.** Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М.: Стройиздат, 1983. – 184 с.

9. **Трусков П. А., Поломошнов А. М., Бекецкий С. П.** Изменчивость физико-механических свойств дрейфующих и припайных льдов: труды ДВНИИ. – 1990. – Вып. 40. – С. 84–91.

Материал поступил в редакцию 31.01.11.

**Козлов Дмитрий Вячеславович**, доктор технических наук, профессор, ректор

Тел. 8 (499) 976-06-85, 8 (499) 976-05-11

**Багин Андрей Владимирович**, инженер

Тел. 8 (495) 189-87-77, 8 (916) 128-87-19