

# Вероятностные аспекты оценки ледовых нагрузок и воздействий на объекты обустройства морских месторождений на примере айсберговой угрозы

## Offshore Hazards: Assessing the Impact of Icebergs on Offshore Production Platforms

Часть 2 - Part 2

Д.А. Онищенко (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

Dmitry A. Onishchenko (Gazprom VNIIGAZ LLC)

### 4 Модель перемещения айсбергов

Важным аспектом при моделировании движения айсбергов является выделение двух масштабов: глобального и локального. Выделим с центром в точке расположения платформы некоторую “локальную” область, площадь которой обозначим  $A_{reg}$  (рис. 1). На уровне глобального масштаба оценивается вероятность (частота) прихода айсбергов в эту область, а на уровне локального масштаба рассчитывается условная вероятность столкновения данного айсберга с платформой (при условии, что он вошел в пределы области). Размеры области должны быть такими, чтобы архивные данные достоверно свидетельствовали о фактах наблюдения айсбергов в пределах выделенной области. Обычно такие области имеют границами меридианы и параллели. Архивные данные по айсбергам в Баренцевом море представлены для областей, занимающих 2 град. по широте и 5 град. по долготе (рис. 2, [16]). Обозначим через  $\lambda$  интенсивность потока айсбергов, приходящих в выделенный район. Отметим, что указанный параметр может оцениваться по архивным данным, но в принципе может и рассчитываться с помощью моделирования полной “судьбы” айсберга методом Монте-Карло от момента его образования у одного из выводных ледников, прослеживания траектории его дрейфа под действием

### 4 Iceberg Movement Model

An important aspect when modelling iceberg movement is the identification of two scales: global and local. Let's select, with the centre at the platform location point, a “local” domain, the area of which we express as  $A_{reg}$  (Fig. 1). At the global scale level, we estimate the probability (frequency) of the icebergs arriving at this area, and at the local scale level, we estimate the conditional probability of an iceberg/platform collision (provided that the iceberg has arrived within the domain boundaries). The dimensions of the region must be such that the archive data would provide reliable evidence of the facts of seeing the icebergs within the selected domain. Usually, such domains have meridians and parallels as boundaries. The archive data on icebergs in the Barents sea are provided for the domains occupying 2 degrees of latitude and 5 degrees of longitude (Fig. 2, [16]). Let  $\lambda$  denote the rate of occurrence for icebergs arriving at the selected region. Note that the said parameter may be assessed using archive data, but, in principle, it can be estimated through modelling of the entire iceberg's “life” using the Monte-Carlo method, from the moment of its formation near one of the outlet glaciers, tracking its drift trajectory under the influence of flow fields and wind within the framework of general regional models of “atmosphere-ice-ocean” type. The estimation using the second option above requires, naturally, colossal computer

полей течений и ветра в рамках общих региональных моделей типа “атмосфера-лед-океан”. Расчет по второму варианту требует, конечно, колоссальных затрат компьютерного времени и достоверной информации о полях течений и ветров.

Введем следующие обозначения:  $D$  – размер пришедшего в район  $A_{reg}$  айсберга (например, характерный или максимальный размер в плане на уровне воды);  $v$  – средняя скорость движения айсберга внутри области;  $t_{res}$  – время пребывания айсберга в пределах области;  $\ell$  – общая длина пути айсберга внутри области. В общем случае все четыре перечисленных параметра являются случайными. Часто предполагается, что величины  $D$  и  $v$  независимы в вероятностном смысле (это, конечно, требует обоснования в конкретных условиях) и описываются соответствующими функциями плотности  $w_D(x)$  и  $w_v(x)$ . В то же время величины  $v$ ,  $t_{res}$  и  $\ell$  заведомо зависимы, поскольку связаны очевидным соотношением

$$\ell = v \cdot t_{res}.$$

Дальнейшее построение модели зависит от гипотез относительно вероятностных распределений данных величин, в том числе, от того, какие из них принять за основные. Например, в модели “дождя” [13], когда имеются основания предполагать, что все айсберги в исследуемом районе совершают преимущественно прямолинейное движение вдоль выделенного направления (рис. 3), за основную переменную рационально принять скорость  $v$ . При этом  $\ell \equiv L_2 = \text{const}$ . Если же движение айсбергов непрямолинейно (рис. 1), или достаточно хаотично, то типичный подход к моделированию в этом случае заключается в предположении, что время  $t_{res}$  распределено по показательному

$$F_t(x) = 1 - e^{-\mu x}, \text{ где}$$

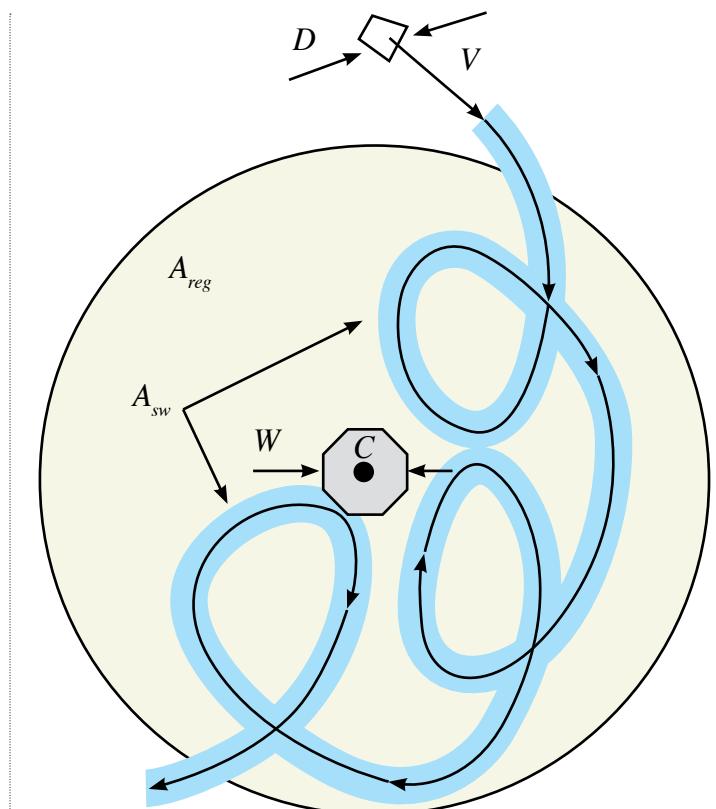
$$\mu = 1 / t_{res}$$

– обратная величина среднего значения времени пребывания айсберга в пределах области. Обычно поток приходящих айсбергов считается пуассоновским, и тогда можно показать, что среднее (в статистическом смысле) значение  $\bar{n}$  числа айсбергов в области  $A_{reg}$  в произвольный момент времени вычисляется по формуле

$$\bar{n} = \lambda / \mu. \quad (10)$$

Для качественного сопоставления различных регионов по уровню айсберговой опасности вводится понятие пространственной плотности айсбергов (среднее число айсбергов в пределах данной области в конкретный момент времени, отнесенное к площади):

$$\rho = \bar{n} / A_{reg}. \quad (11)$$



**Рисунок 1:** Схема, описывающая модель хаотического движения айсбергов

**Figure 1:** Pattern showing chaotic iceberg motion model

time consumption and credible information on the flow fields and winds.

Let's introduce the following symbols:  $D$  – the size of the iceberg entering the region  $A_{reg}$  (e.g. typical or maximum plane size at the water level);  $v$  – the average speed of the iceberg movement within the domain;  $t_{res}$  – the duration of the icebergs stay within the domain;  $\ell$  – the total length of the iceberg travel distance within the domain. In the general case, all the four above-mentioned parameters are random. It's often assumed that the values  $D$  and  $v$  are independent in the probability sense (which, of course, requires to be substantiated in the specific conditions) and are described with the corresponding density functions  $w_D(x)$  и  $w_v(x)$ . At the same time, the values  $v$ ,  $t_{res}$  and  $\ell$  are invariably dependent, as they are connected by an evident relation

$$\ell = v \cdot t_{res}.$$

Further construction of the model depends on the hypotheses of probability distributions of these variables, including on which of them should be adopted as the basic ones. For example, in the “rain drops” model [13], when there are grounds to assume that all the icebergs in the region of study carry out predominantly rectilinear movements along the selected direction (Fig. 3), the speed  $v$  should be adopted as the basic variable. With

Переходим к расчету вероятности столкновения айсберга с платформой. За время пребывания айсберга в районе он проходит путь  $\ell = v t_{res}$  и “заметает” площадь  $A_{sw} = \ell D$  (рис. 1).

Столкновение происходит тогда и только тогда, когда расстояние между “центрами” платформы и айсберга оказывается меньше  $(W+D)/2$ , где  $W$  – характерный размер платформы на уровне ватерлинии. Если интерпретировать это как попадание центра платформы (точка  $C$  на рис. 1) в полосу шириной  $W+D$  и длиной  $\ell$ , которая некоторым случайным образом расположена внутри области, то условная вероятность  $p_{imp}(D, v)$  столкновения пришедшего в район айсберга с платформой (при условии, что его диаметр равен, а скорость  $v$ ) может быть оценена с помощью выражения

$$p_{imp}(D, v) = (D + W)/L_1 = (D + W)L_2/L_1 L_2 = A_{sw}/A_{reg}. \quad (12)$$

Для модели “дождя”, согласно вышесказанному,  $\ell = L_2$ , а для модели хаотического движения  $\ell = v/\mu$ .

Теперь можно определить условную вероятность  $P_{imp}$  столкновения платформы с айсбергом, имеющим произвольные (неизвестные) размер и скорость, при условии, что он появился в рассматриваемом районе:

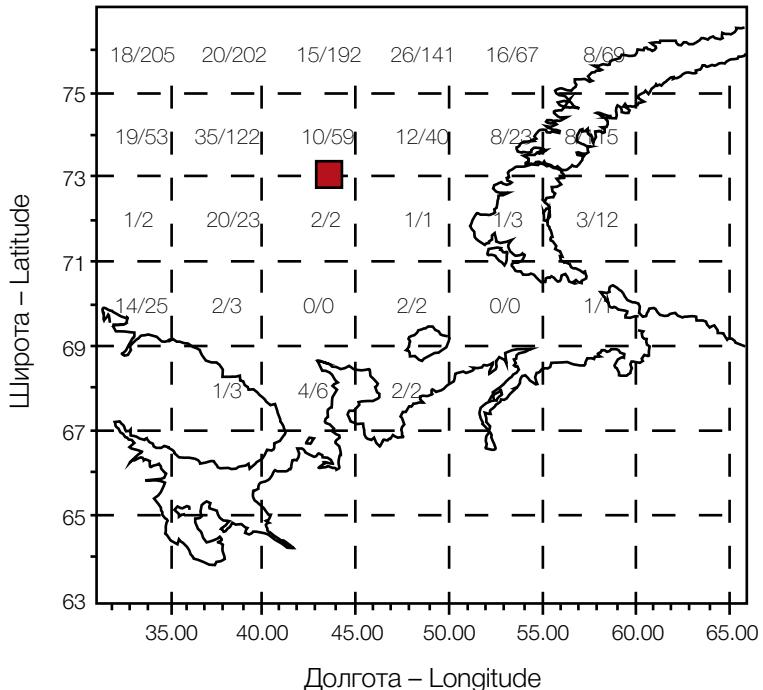
$$P_{imp} = \int_0^{D_{max}} \int_0^{v_{max}} p_{mp}(x_1, x_2) w_D(x_1) w_v(x_2) dx_1 dx_2, \quad (13)$$

где  $D_{max}$  характеризует максимальный айсберг, который может достичь границ рассматриваемого района (с учетом географических и климатических особенностей региона), а  $v_{max}$  – максимально возможная по физическим ограничениям скорость дрейфа айсберга. Заметим, что применяемый подход позволяет достаточно просто учесть снижение вероятности столкновения за счет применения системы мониторинга и активного воздействия на айсберги с целью их отвода. Если предположить, что эффективность такой системы применительно к айсбергу размера  $D$  и со скоростью  $v$  характеризуется вероятностью неудачи  $\gamma(D, v)$ , то формула для условной вероятности возможного столкновения принимает вид

$$P_{imp} = \int_0^{D_{max}} \int_0^{v_{max}} p_{imp}(x_1, x_2) \gamma(x_1, x_2) w_D(x_1) w_v(x_2) dx_1 dx_2.$$

Если имеющихся статистических данных недостаточно для определения зависимости скорости айсберга от его размера и если в целях упрощения принять, что успешность операций по воздействию на айсберг не зависит от его размеров и скорости и равна  $\gamma = \text{const}$ , то можно получить следующее выражение для оценки

that in mind,  $\ell \equiv L_2 = \text{const}$ . If the icebergs movement is not rectilinear (Fig. 1) or is sufficiently chaotic, the typical approach to modelling in this case would be an assumption that the time  $t_{res}$  is distributed under the exponent rule  $F_t(x) = 1 - e^{-\mu x}$ , where  $\mu = 1/t_{res}$



**Рисунок 2:** Данные о наблюдениях айсбергов в за период наблюдений 1888–1991 гг. [16] (красным квадратом обозначено Штокмановское месторождение)

**Figure 2:** Iceberg observations data for observation period 1888-1991 [16] (red mark representing Shtokman field)

is a reciprocal of the average value of the time spent by the iceberg within the domain. Usually, the flow of arriving icebergs is considered a Poisson input, and then it is possible to show that the average (statistical) value  $\bar{n}$  of the number of icebergs in domain  $A_{reg}$  at an arbitrary time point is calculated from the formula

$$\bar{n} = \lambda / \mu. \quad (10)$$

For quality comparison of different regions in terms of the level of iceberg hazard, we introduce the notion of spatial density of icebergs (the average number of icebergs within the given domain at a certain time point, referred to the area):

$$\rho = \bar{n} / A_{reg}. \quad (11)$$

Let's move on to the calculation of the probability of an iceberg/platform collision. For the duration of the iceberg stay in the region it travels over the distance  $\ell = v t_{res}$  and “sweeps” the area  $A_{sw} = \ell D$  (Fig. 1).

условной вероятности столкновения пришедшего айсберга с платформой:

$$P_{imp} = \gamma(\bar{D} + W)\bar{v}F_{res}/A_{reg}, \quad (14)$$

где черта сверху обозначает среднее значение соответствующей случайной величины.

Как уже отмечалось, одной вероятности столкновения недостаточно для задания расчетной нагрузки.

Для проектирования необходимо рассчитывать вероятность более сложных случайных событий, характеризующих не только сам факт столкновения, но и параметры столкнувшегося айсберга. Приведем несколько характерных примеров.

В рамках описываемого подхода можно, например, рассчитать условную вероятность  $P_{imp}^*(D)$  столкновения платформы с айсбергом, размер которого не меньше заданного значения  $D$ , при условии, что в районе появился айсберг с неизвестными параметрами (при отсутствии системы активного воздействия на айсберги):

$$P_{imp}^*(D) = (1/A_{reg}) \bar{v} F_{res} \int_D^{D_{max}} (x_1 + W) w_D(x_1) dx_1 \quad (15)$$

Эта величина монотонно убывает от  $P_{imp}$  до 0 при возрастании  $D$  от 0 до  $D_{max}$ .

Чтобы найти безусловную вероятность столкновения платформы с айсбергом, необходимо учесть частоту прихода айсбергов в исследуемый район. Если использовать модель пуссоновского потока с интенсивностью  $\lambda$ , то, как известно, вероятности появления ровно  $k$  айсбергов ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) в течение интервала времени  $T$  вычисляются по формуле

$$P_{arr}(k, T) = (\lambda T)^k e^{-\lambda T} / k!$$

Теперь можно показать, что безусловная вероятность столкновения платформы в течение периода времени  $T$  с айсбергом, размер которого не меньше заданного значения  $D$ , определяется соотношением

$$P(D, T) = 1 - \exp[-\lambda T P_{imp}^*(D)] \quad (16)$$

(при  $D=0$  получаем безусловную вероятность столкновения платформы в течение периода времени  $T$  с произвольным айсбергом).

В действительности, найденное соотношение (16) справедливо как для редких событий, так и для частых (см. [17]), конечно, в рамках сделанных предположений. Однако для редких событий, к которым относится столкновение с айсбергом, величина  $P_{imp}^*(D)$  весьма мала, что позволяет записать следующую

A collision occurs when (and only when) the distance between the “centres” of the platform and the iceberg turns out to be less than  $(W+D)/2$ , where  $W$  is a characteristic size of the platform at the waterline level. If this is interpreted as the platform centre (point  $C$  in Fig. 1) being within a band of width  $W+D$  and length  $\ell$ , which in some random manner is located within the domain, then the conditional probability  $p_{imp}(D, v)$  of collision between the iceberg arriving at the region and the platform (provided that its diameter is  $D$ , and the speed is  $v$ ) may be estimated from the expression

$$p_{imp}(D, v) = (D + W)/L_1 = (D + W)L_2/L_1 L_2 = A_{sw}/A_{reg}. \quad (12)$$

For the rain drops model, in accordance with the above,  $\ell = L_2$ , and for the chaotic movement model  $\ell = v/\mu$ .

Now we can determine a conditional probability  $P_{imp}$  of the collision of the platform with an iceberg of random (unknown) size and speed, provided that it arrived at the region under consideration:

$$P_{imp} = \int_0^{D_{max}} \int_0^{v_{max}} p_{imp}(x_1, x_2) w_D(x_1) w_v(x_2) dx_1 dx_2, \quad (13)$$

where  $D_{max}$  characterises the maximum iceberg that can reach the boundaries of the region under consideration (taking account of the geographic and climatic features of the region), and  $v_{max}$  is the maximum possible, by physical limits, speed of the iceberg drift. Note that the used approach allows to quite simply take into account reducing the collision probability owing to the monitoring system and active action on the icebergs for the purpose of their diversion. If we assume that the efficiency of such a system in relation to an iceberg of size  $D$  and speed  $v$  is characterised by a failure probability  $\gamma(D, v)$ , the formula for conditional probability of a possible collision would become

$$P_{imp} = \int_0^{D_{max}} \int_0^{v_{max}} p_{imp}(x_1, x_2) \gamma(x_1, x_2) w_D(x_1) w_v(x_2) dx_1 dx_2.$$

If the available statistical data is insufficient to determine the relationship between the iceberg speed and its size, and if, for simplicity, we assume that the success rate of the operations aimed at impacting the iceberg does not depend on its size and speed and equals  $\gamma = \text{const}$ , we can obtain the following expression for estimation of the conditional probability of the collision of the arriving iceberg with the platform:

$$P_{imp} = \gamma(\bar{D} + W)\bar{v}F_{res}/A_{reg}, \quad (14)$$

where the line above means the mean value of the corresponding random variable.

As noted earlier, the collision probability alone is not enough for setting the design load. For the purposes of design, it is necessary to design the probability of more complex random events that characterise not only the fact of

приближенную формулу:

$$P(D, T) \approx \lambda T P_{imp}^*(D),$$

точность которой не хуже  $(\lambda T P_{imp}^*)^2$ .

Отметим, что в рамках описанного подхода можно рассчитать различные другие показатели айсберговой опасности, например, вероятностную функцию распределения кинетической энергии айсберга, соударяющегося с платформой:

$$F_K^*(z) \equiv \Pr\{K < z / Imp\} =$$

$$= \int_0^{D_{max}} \int_0^{v_{max}} \int_0^{k_{max}} (x_1 + W) / (\bar{D} + W) F_h(z / (x_3 x_1^2 x_2^2)) w_D(x_1) w_v(x_2) w_k(x_3) dx_1 dx_2 dx_3.$$

Предполагается, что кинетическая энергия  $K$  вычисляется по формуле

$$K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} (\pi D^2 / 4) k' h \rho_{ice} v^2 = k \rho_{ice} D^2 h v^2$$

где  $h$  – общая высота айсберга,  $D$  – его диаметр на уровне ватерлинии,  $v$  – скорость,  $k$  – коэффициент формы, а  $\rho_{ice}$  – плотность льда айсберга. Все величины, кроме последней, предполагаются случайными с известными вероятностными распределениями: функцией распределения  $F_h(x)$  и функциями плотности  $w_D(x_1), w_v(x_2), w_k(x_3)$  соответственно.

Для получения численных оценок требуются соответствующие исходные данные. Вопрос о способах их получения, оценке их достоверности и полноты требует отдельного рассмотрения.

## 5 Оценка частоты столкновений айсберга с платформой

Выполним оценочные расчеты вероятности столкновения платформы с айсбергом для района Штокмановского месторождения (ШГКМ), расположенного в Баренцевом море. Анализ архивных данных за период 1888-1991 гг. [8,16] показывает, что общее число айсбергов, наблюденных за весь 100-летний период в районе, представляющим собой географический квадрат 72-74° с.ш., 40-45° в.д. площадью  $A_{reg} = 36000 \text{ м}^2$  (рис. 2), может быть оценено значением 30. Это соответствует частоте прихода айсбергов в количестве 0,3 в год. В 2003 г. очередная ледоисследовательская экспедиция в район ШГКМ [16] зафиксировала факт аномального выброса айсбергов: общее число зафиксированных айсбергов и их обломков составило 41. Объединяя информацию в один массив, принимаем среднюю интенсивность прихода айсбергов  $\lambda = 0,7 / T_1$ , где  $T_1$  – длительность одного года в выбранных единицах времени. Примем средний размер айсбергов на уровне ватерлинии равным  $D = 100 \text{ м}$ , а диаметр плавучей платформы  $W = 50 \text{ м}$ . Средняя скорость дрейфа оценивается как  $v_{drift} =$

collision, but the parameters of the colliding iceberg too. Let us give you some typical examples.

Within the framework of the described approach we can, for instance, estimate the conditional probability  $P_{imp}^*(D)$  of a collision between the platform and an iceberg whose size is above the established value  $D$ , provided that in the region an iceberg with unknown parameters has turned up (in the absence of a system of active impact on icebergs):

$$P_{imp}^*(D) = (1/A_{reg}) \bar{v} \bar{t}_{res} \int_D^{D_{max}} (x_1 + W) w_D(x_1) dx_1 \quad (15)$$

This value monotonically decreasing from  $P_{imp}^*$  to 0 as  $D$  rises from 0 to  $D_{max}$ .

To find the unconditional probability of the platform/iceberg collision, the frequency of icebergs arrival at the region of study should be taken account of. If we use a Poisson flow model with intensity  $\lambda$ , then, as is known, the probabilities of occurrence of precisely  $k$  icebergs ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) during the time interval  $T$  are calculated from the formula

$$P_{arr}(k, T) = (\lambda T)^k e^{-\lambda T} / k!$$

Now we can show that the unconditional probability of the platform collision within the time period  $T$  with an iceberg, whose size is above the established value  $D$ , is calculated by the relationship

$$P(D, T) = 1 - \exp[-\lambda T P_{imp}^*(D)] \quad (16)$$

(if  $D=0$ , we obtain an unconditional probability of collision of the platform during the time period  $T$  with a random iceberg).

In fact, the found relationship (16) is true for both rare events and frequent ones (see [17]), of course, within the framework of the assumptions made. However, for rare events, which include a collision with an iceberg, the value  $P_{imp}^*(D)$  is very small, and that allows to write down the following approximation formula:

$$P(D, T) \approx \lambda T P_{imp}^*(D),$$

whose accuracy is not worse than  $(\lambda T P_{imp}^*)^2$ .

Note that within the framework of the described approach we can estimate various other indicators of the iceberg hazard such as the probabilistic function of distribution of kinetic energy for an iceberg colliding with the platform:

$$F_K^*(z) \equiv \Pr\{K < z / Imp\} =$$

$$= \int_0^{D_{max}} \int_0^{v_{max}} \int_0^{k_{max}} (x_1 + W) / (\bar{D} + W) F_h(z / (x_3 x_1^2 x_2^2)) w_D(x_1) w_v(x_2) w_k(x_3) dx_1 dx_2 dx_3.$$

It is assumed that the kinetic energy  $K$  is calculated from

0,2 м/с. Тогда, при условии прямолинейного движения айсберга оценка максимальной длительности его пребывания в рассматриваемом районе составляет 12 сут. Наблюдения за айсбергами в Баренцевом море показывают, что траектории их движения значительно отличаются от прямолинейных. Была найдена оценка для коэффициента извилистости траекторий айсбергов для условий центральной части Баренцева моря:  $k_{\text{изв}} = 5$  [16]. Для дальнейших расчетов примем три характерных значения средней длительности пребывания айсберга в районе  $A_{\text{reg}}$ :

$t_{\text{res}} = 20 \text{ сут}, 40 \text{ сут}, 60 \text{ сут}$ .

Соответствующие значения пространственной плотности айсбергов, вычисляемые по формуле (11), равны

$$\rho = 1,1 \cdot 10^{-12}; 2,1 \cdot 10^{-12}; 3,2 \cdot 10^{-12} \quad (17)$$

Используя соотношение (14), находим, что вероятности столкновения с пришедшим в район айсбергом для этих трех случаев равны 0,0014; 0,0029 и 0,0043. С учетом интенсивности прихода айсбергов в рассматриваемый квадрат получаем, что ожидаемое число столкновений в течение года с айсбергом для платформы, размещенной на Штокмановском месторождении, составляет 0,001; 0,002 и 0,003 соответственно. Ниже будет показано, что найденные

значения находятся в хорошем соответствии с результатами расчетов, выполненных при оценке айсберговой опасности для месторождений шельфа Канады (с учетом пересчета интенсивности потока приходящих айсбергов).

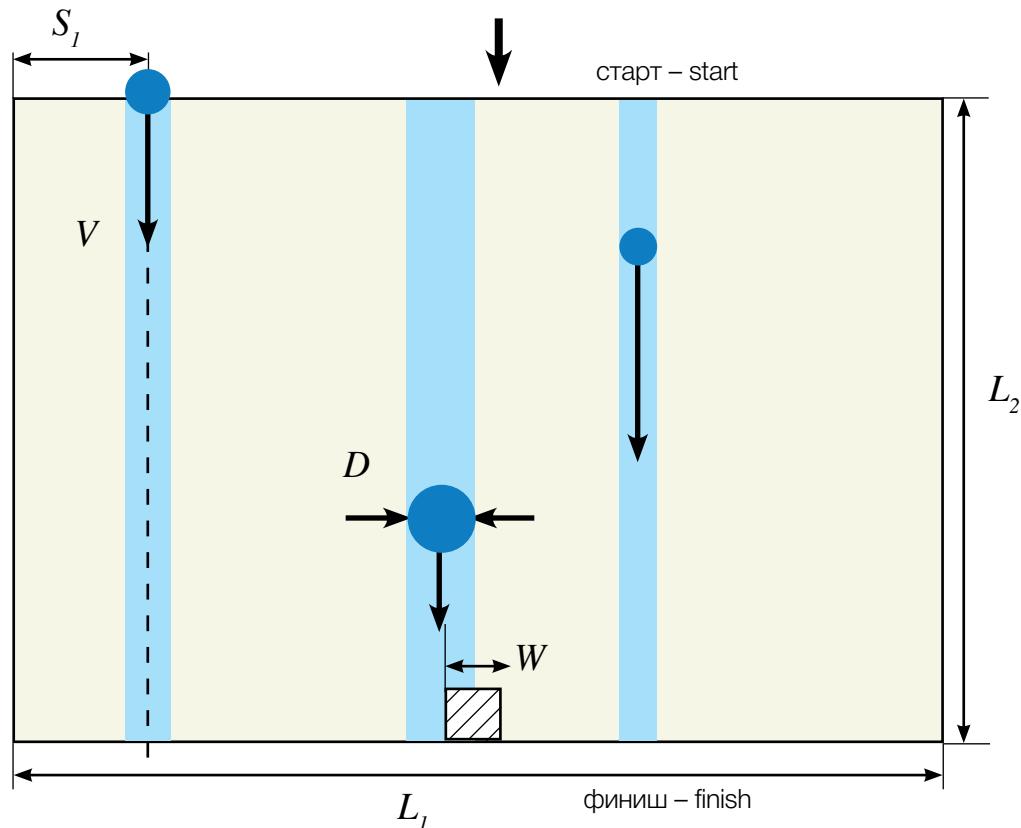
Необходимо отметить, что в работах специалистов ААНИИ на основе тех же исходных данных получена оценка частоты столкновения с айсбергом 1 раз в 35 лет [16] (в работе [8] приводится несколько иная оценка – 1 раз в 104 года), что отвечает вероятности столкновения в течение года примерно равной 0,03

the formula

$$K = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} (\pi D^2 / 4) k' h \rho_{\text{ice}} v^2 = k \rho_{\text{ice}} D^2 h v^2$$

where  $h$  is the total height of the iceberg,  $D$  is its diameter at the waterline level,  $v$  is the speed,  $k$  is the form coefficient, and  $\rho_{\text{ice}}$  is the density of the iceberg's ice. All the values except the last one are assumed as random with known probability distributions: distribution function  $F_h(x_4)$  and density functions  $w_D(x_1), w_v(x_2), w_k(x_3)$  respectively.

To obtain numerical estimates, the relevant source data is required. The issue of obtaining such data, analysis of its credibility and completeness is the subject of a separate review.



**Рисунок 3:** Модель дождя [Rain drops model]

**Figure 3:** Rain drops model

## 5 Assessment of the Frequency of Iceberg to Platform Collisions

Let's run estimates of probability of the platform/iceberg collision for the Shtokman field area located in the Barents Sea. The analysis of archive data for the years 1888-1991 [8,16] has demonstrated that the total number of icebergs observed during the entire 100-year period in the region being a geographic square 72-74° north, 40-45° east, of area  $A_{\text{reg}} = 36,000 \text{ m}^2$  (Fig. 2), may be estimated at 30. This corresponds to the frequency of the icebergs arrival of 0.3 per year. In 2003, a regular ice research expedition

(соответственно, 0,01). Оба значения, полученные с помощью методики, отличной от изложенной в настоящей работе, на порядок больше приведенных выше. Также в указанных работах приводится оценка, согласно которой в районе ШГКМ в среднем 1 раз в 5 лет с вероятностью 95% следует ожидать приход от 9 до 19 айсбергов в течение одного года, а один раз в 10 лет – от 12 до 26. С учетом вышесказанного, представляется, что в указанных работах степень айсберговой угрозы, выражаемая в вероятностных показателях, существенно завышена. По-видимому, это является следствием выбранного подхода, не отражающего всей специфики проблемы.

Интересно сопоставить данные по частоте появления айсбергов с районом Ньюфаундлендской банки (восточное побережье Канады). Там айсберги появляются гораздо чаще. Например, в квадрате 46-47,5° с.ш., 47,5-49,5° з.д. площадью 26000 км<sup>2</sup> среднее количество наблюдаемых айсбергов составляет 72,6 в апреле и 88,9 в мае [7]. Отметим, что имеется значительная неравномерность поступления айсбергов в рассматриваемый район. Так, например, в 1984 г. параллель 48° с.ш. пересекло более 2200 айсбергов, а в 1966 г. не было зафиксировано ни одного такого случая, что в сопоставлении со случаем зафиксированного в 2003 г. массового выброса айсбергов в район ШГКМ [8], по-видимому, позволяет сделать вывод о том, что такие ситуации хоть и имеют низкие вероятности реализации, тем не менее являются типичными для изучаемой проблемы.

Для квадрата 46-47° с.ш., 48-49 з.д. площадью 8500 км<sup>2</sup>, где расположено месторождение White Rose, при моделировании айсберговой угрозы среднегодовое число айсбергов, приходящих в указанный квадрат, оценено числом 70. Пространственная плотность айсбергов для данного района равна  $\rho = 2,5 \cdot 10^{-10}$ , что на два порядка превышает соответствующий показатель (17) для района ШГКМ.

Согласно проведенным на предпроектной стадии расчетам, для индивидуального айсберга вероятность столкновения с плавучей платформой или судном FPSO, установленным на месторождении White Rose, составляет значение порядка 0,002...0,003 (как известно, на месторождении реализована концепция FPSO). С учетом интенсивности потока приходящих айсбергов, годовая частота случаев столкновения с айсбергами составляет 0,14...0,21. Это почти на два порядка больше по сравнению с полученными выше оценками для ШГКМ, что находится в полном соответствии с тем фактом, что интенсивность потока айсбергов

visiting the Shtokman gas condensate field [16] recorded an abnormal outbreak of icebergs: the total number of the recorded icebergs and their fragments was 41. By combining the information in one array, we assume the average rate of iceberg occurrence  $\lambda = 0,7/T_1$ , where  $T_1$  is the duration of one year in the selected units of time. Let's assume the average size of the icebergs at the waterline level as  $D = 100$  m, and the diameter of the floating platform as  $W = 50$  m. The average drift velocity is estimated at  $v_{drift} = 0.2$  m/s. Then, provided that the iceberg movement is rectilinear, the maximum duration of its stay in the region under consideration is 12 days. Observations of icebergs in the Barents Sea demonstrate that their trajectories are significantly different from rectilinear. An estimated value was found for the tortuosity of icebergs' trajectories for the central part of the Barents Sea:  $k_{curve} = 5$  [16]. For further calculations, let's assume three characteristic values of the average duration of iceberg stay in region  $A_{reg}$ :

$$t_{res} = 20, 40, 60 \text{ days.}$$

The corresponding values of spatial density for icebergs calculated from the formula (11) are

$$\rho = 1,1 \cdot 10^{-12}, 2,1 \cdot 10^{-12}, 3,2 \cdot 10^{-12} \quad (17)$$

Using the ratio (14), we find that the probabilities of collision with an iceberg arriving at the region for these three cases are 0.0014, 0.0029 and 0.0043. Taking account of the frequency of the icebergs arrival at the square under consideration, we obtain that the anticipated numbers of collisions with an iceberg during a year for a platform located in the Shtokman field are 0.001, 0.002 and 0.003 respectively. We will show below that the found values are in good agreement with the results of estimations made when evaluating the iceberg hazard for Canadian offshore fields (honouring the rate of occurrence of the arriving icebergs).

We should note that in the works of AARI specialists based on the same source data, the estimated frequency of iceberg collisions is once every 35 years [16] (in the work [8], a slightly different estimate is given, once every 104 years), which is equivalent to the probability of collision during a year approximately equal to 0.03 (and 0.01, respectively). Both values obtained using the methodology different from the described in this work, are one order of magnitude greater than those above. Also, the said works contain an estimate according to which in the Shtokman field area, on the average once every five years, with 95% probability, one should expect the arrival of 9 to 19 icebergs during a year, and once every 10 years - from 12 to 26 icebergs. In view of the above, it appears that in the said works the degree of the iceberg hazard expressed in probabilistic indicators is considerably overestimated. It seems that this is a



на Ньюфаундленской банке более чем в 100 раз превосходит аналогичный показатель для ШГКМ.

При этом проектом обустройства месторождения White Rose допускается столкновение с айсбергом массой до 100000 т. С учетом применения системы айсбергового мониторинга и, при необходимости, мер по активному воздействию на айсберги (эффективность всей системы оценивается как 85-90%), а также возможности отсоединения райзеров и якорных линий в экстремальных ситуациях (надежность этой технической операции принята равной 99%), итоговая вероятность столкновения платформы в течение года с айсбергом, масса которого превышает 100000 т, оценивается как  $(1,2...1,6) \cdot 10^{-4}$ , что признано удовлетворяющим критерию безопасности.

Нефтяное месторождение Хайберния (Hibernia) расположено в 315 км к юго-востоку от побережья о. Ньюфаундленд, немного южнее месторождения White Rose. Частота появления айсбергов здесь немного меньше. Платформа гравитационного типа (Gravity Base Structure, GBS) "Хайберния" является первой и пока единственной в мире платформой, запроектированной на восприятие удара айсберга. Расчетный айсберг по критерию прочности (соударение с которым платформа должна выдерживать без каких-то бы ни было повреждений) имеет массу 1 млн т, при этом повторяемость такого события оценивается как 1 раз в 500 лет. Расчетный айсберг по критерию безопасности (при соударении с которым платформа может получить локальные повреждения,

consequence of the chosen approach that does not reflect all the specific aspects of the problem.

It would be interesting to compare the iceberg occurrence rate data with those for the Grand Banks of Newfoundland (east coast of Canada). There, icebergs occur much more often. For example, in the square 46-47.5° north, 47.5-49.5° west, of 26,000 km<sup>2</sup> area, the average number of observed icebergs is 72.6 in April and 88.9 in May [7]. Note that there is a substantial irregularity of the icebergs arrival at the region under consideration. For example, in 1984, the 48° north parallel was crossed by over 2200 icebergs, and in 1966 no such cases at all were recorded, which, in comparison with the massive arrival of icebergs at the Shtokman field area recorded in 2003 [8], as it seems, allows to draw a conclusion that such situations, despite having low probabilities of occurrence, are still typical for the problem under study.

For the square 46-47° north, 48-49° west with the area 8500 km<sup>2</sup>, where the White Rose field is located, when modelling the iceberg hazard, the average annual number of icebergs arriving at the said square is estimated at 70. The spatial density of icebergs for this region is  $\rho = 2,5 \cdot 10^{-10}$ , which is two orders of magnitude greater than the corresponding indicator (17) for the Shtokman gas condensate field area.

According to the calculations made at the pre-design phase, for an individual iceberg, the probability of collision with a floating platform or FPSO vessel installed in the White Rose field is in the order of 0.002...0.003 (as is known, the FPSO concept was implemented in the field). Taking account of the rate of occurrence for the arriving icebergs, the annual frequency of iceberg collisions is 0.14...0.21. This is almost two orders of magnitude greater than the obtained above estimates for the Shtokman field, and it is in full agreement with the fact that the rate of occurrence of icebergs in the Grand Banks of Newfoundland is 100+ times greater than the same indicator for the Shtokman field.

Furthermore, the development plan for the White Rose field provides for a possible collision with an iceberg weighing up to 100,000 tons. Taking account of the application of the iceberg monitoring system and, where necessary, measures of making active impact on the icebergs (the efficiency of the entire system being estimated at 85-90%), and also potential disconnection of risers and anchor lines in emergency situations (the reliability of this technical operation is assumed as 99%), the resulting probability of the platform collision during a year with an iceberg whose weight exceeds 100,000 tonnes is estimated at  $(1,2...1,6) \cdot 10^{-4}$ , which is regarded as meeting the safety criterion.

устранимые последующим ремонтом) имеет массу 6 млн т, при этом повторяемость такого события оценивается как 1 раз в 10000 лет. Рассчитанная для платформы "Хайберния" частота столкновений с айсбергом составляет порядка 1 случая в 10 лет, что соответствует вероятности столкновения 0,1 в течение года. Кроме того, проектом предусмотрена постоянно действующая программа ледового мониторинга, предусматривающая наличие систем раннего обнаружения, отслеживания и активного воздействия на айсберги, что призвано снизить вероятность соударения айсбергом с платформой. Более чем за 10 лет эксплуатации платформы "Хайберния" не было сообщений ни об одном случае столкновения, хотя в работе [15] в рамках подхода, учитывающего достаточно большую вероятность пропуска небольших по размеру айсбергов в процессе реализации мониторинга и тем самым значительно увеличивающим прогнозное значение числа приходящих айсбергов, получена оценка частоты столкновения порядка 0,3 случаев в год, что снова существенно выше, чем для условий Штокмановского месторождения.

### **Заключение**

По результатам сопоставительного анализа «детерминистического» (традиционного) и «вероятностного» подходов к проектированию сделан вывод, что основным препятствием для так называемого вероятностного подхода к проектированию может оказаться недостаток исходных данных о вероятностных распределениях определяющих параметров. В то же время, на примере задачи об оценке айсберговой опасности продемонстрирована эффективность применения вероятностных подходов к задачам определенного класса. Приведен вариант построения и анализа модели, позволяющей рассчитывать различные показатели айсберговой опасности для морских платформ, включая вероятность столкновения с айсбергом, у которого определенные параметры (например, диаметр, масса или кинетическая энергия) имеют значения, не ниже заданных. Приведены оценочные значения вероятности столкновения айсberга с платформой в условиях Штокмановского месторождения, которые оказываются на порядок более низкими по сравнению с аналогичными значениями, полученными ранее другими авторами. Для применения описанной методики на проектной стадии освоения Штокмановского месторождения необходимо провести более детальный статистический анализ имеющейся базы данных по наблюдению айсбергов в Баренцевом море с целью определения с достаточной степенью надежности вероятностных распределений параметров айсбергов, используемых в рамках предложенного подхода.

The Hibernia oil field is located 315 km south-east off the coast of the island of Newfoundland, just a bit south of the White Rose field. The frequency of iceberg occurrence here is much lower. Hibernia Gravity Base Structure (GBS) is the first platform (and the only one in the world so far) designed to survive a collision with an iceberg. The design iceberg, by the strength criterion (collision with which the platform must withstand without any damage), weighs 1 million tons, and the repeatability of such an event is estimated as once every 500 years. The design iceberg, by the safety criterion (when colliding with which the platform can sustain local damage that can be remedied by a later repair), weighs 6 million tons, and the repeatability of such an event is estimated as once every 10,000 years. The frequency of iceberg collisions estimated for the Hibernia platform is in the order of 1 event per 10 years, which is equivalent to the collision probability of 0.1 during a year. Moreover, the design provides for an ongoing ice monitoring programme based on the availability of systems of early warning, tracking and active action on icebergs aimed at reducing the probability of iceberg/platform collisions. For over 10 years of operation of the Hibernia platform no collisions have been reported, though in the work [15] within the framework of the approach honouring a quite large probability of omitting smaller icebergs in the course of the monitoring implementation, thus considerably increasing the forecast value of the number of arriving icebergs, an estimated frequency of iceberg collisions was obtained at 0.3 events per year, which, again, is considerably higher than that for the conditions of the Shtokman field.

### **Conclusion**

From the results of a comparative analysis of the "deterministic" (traditional) and "probabilistic" design approaches, a conclusion has been drawn that the main hindrance for the so-called probabilistic design approach may be the lack of source data on probabilistic distributions of the determining parameters. At the same time, the example of the task to estimate the iceberg hazard has demonstrated the efficiency of application of probabilistic approaches to the tasks of a certain class. An example of a model construction and analysis has been given that allows to calculate various indicators of the iceberg hazard for offshore platforms, including the probability of collision with an iceberg whose certain parameters (e.g. diameter, weight or kinetic energy) have values above the established ones. The estimated values for probability of iceberg/platform collision are given for the Shtokman field conditions, which are an order of magnitude smaller than the similar values obtained earlier by other authors. In order to apply the described methodology at the design phase of the Shtokman field development, it is necessary to carry out a more detailed statistical analysis of the available database of icebergs observations in the Barents Sea, so that we could determine with an adequate degree of reliability of probabilistic distributions of iceberg parameters used within the framework of the proposed approach.