Записки Санкт-Петербургского горного института имени Г.В.Плеханова.
Т.130. СПб, 1992

УДК 551.324.54.550

К.В.БЛИНОВ, Р.Н.ВОСТРЕЦОВ,
Д.Н.ДМИТРИЕВ

# ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА АНТАРКТИДЫ, ПО ПРОФИЛЮ ОБСЕРВАТОРИЯ МИРНЫЙ – СТАНЦИЯ ВОСТОК.

Сопоставление результатов термоизмерений, выполненных авторами в скважинах, пробуренных по гляциологическому профилю обсерватория Мирный – стэнция Восток, показало существенное различие абсолютных значений и характера изменения температуры с глубиной в различных районах ледникового покрова Антарктиды. В то же время обработка и анализ полученных данных позволили выделить ряд характерных изменений температурного градиента, которые закономерно прослеживаются от скважины к скважине и скорее всего связаны с неоднородностью термических свойств льда, в частности коэффициента теплопроводности в толще ледникового покрова [1].

В работе [2] И.А.Зотиков показал, что характер распределения температуры в толще ледника существенно определяется не только передачей тепла в вертикальном направлении за счет теплопроводности, но и переносом тепла за счет теплосодержания массы льда, перемещающейся в вертикальном положении. Влияние активного вертикального переноса массы льда на теплообмен в леднике может быть количественно определено безразмерными параметрами $Pe = v_в H/a$ и $n = v_н/v_в$ (здесь $v_в$ – скорость аккумуляции у поверхности ледника; $H$ – мощность ледника; $v_н$ – скорость таяния льда у ложа ледника).

Запишем уравнение переноса тепла с учетом скорости оседания льда:

$$\lambda \frac{d^2T}{dy^2} - v_в c \rho g \frac{dT}{dy} = 0, \qquad (1)$$

где $\lambda$ – коэффициент теплопроводности льда; $T$ – температура, измеренная в толще ледника на расстоянии $y$ от его ложа; $c$ – теплоемкость льда; $\rho$ – плотность льда; $g$ – ускорение свободного падения.

Первый член этого уравнения характеризует передачу тепла за счет теплопроводности, а второй – за счет теплосодержания льда, перемещающегося в вертикальном направлении. При разности температур у верхней и нижней поверхностей ледника $\Delta T$ и толщине ледника $H$ порядок членов уравнения (1) будет равен соответственно $\lambda \Delta T / H^2$ и $v_в c \rho g \Delta T / H$. Следовательно, степень влияния каждого из этих членов на распределение температуры в леднике может быть оценена как отношение (критерий Пекле)

$$v_в c\rho g \frac{\Delta T}{H}\left[\lambda \frac{\Delta T}{H^2}\right]^{-1} = \frac{v_в H}{a} = Pe,$$

где $a$ – коэффициент температуропроводности, $a = \lambda/c\rho g$.

Расчеты показали, что учет обоих членов дифференциального уравнения (I) необходим при значениях критерия $Pe$ от 0,2 до 100 [2].

Для центральной части ледникового покрова Антарктиды, где проведена большая часть термоизмерений, скорость накопления осадков составляет 2–10 см/год, что при мощности ледника 2500–3500 м приводит к $Pe = 1 \div 5$. Следовательно, при изучении распределения температуры таком леднике необходимо учитывать критерии вертикального движения $Pe$ : $n$. С другой стороны, используя данные о распределении температуры по вертикальному разрезу ледника, его геометрических параметрах и физических свойствах, можно подобрать соответствующие значения критериев $Pe$ и $n$ и оценить по ним динамические параметры $v_в$ и $v_н$, определяющие скорость перемещения масс льда в вертикальном направлении.

Оценка динамических параметров для различных районов ледникового покрова по гляциологическому профилю Мирный – Восток проводилась по результатам термоизмерений на скважинах: № I-26ис (глубина 900 м) и № 3Г (2075 м) на станции Восток, № 2-В-I (420 м) на станции Восток-I, № 2П (380 м) на станции Пионерская и № I-БГ (640 м) на 73-м километре трассы обсерватория Мирный – станция Восток.

Интерпретация данных термометрии проводилась в рамках математической модели, предложенной в работе [2]. Перенос тепла в модели описывается уравнением (I) со следующими граничными условиями на верхней и нижней поверхностях: $y = H \Rightarrow T = T_в$; $y = 0 \Rightarrow T = T_н$. Начало координат выбрано у нижней поверхности ледника с осью $y$, направленной вертикально вверх. Температура и скорости у верхней и нижней поверхности ледника приняты постоянными во времени. Физические параметры льда: его плотность, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности приняты неизменными по толщине ледника, что в первом приближении вполне обоснованно [2].

После соответствующих преобразований и перехода к безразмерным параметрам поле температуры в толще ледника в соответствии с принятой моделью описывается выражением

$$\bar{T} = \frac{\operatorname{erf}\left[\sqrt{\frac{Pe}{2}}\left(\sqrt{1-n}\,\bar{y} + \frac{n}{\sqrt{1-n}}\right)\right] - \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{Pe}{2}}\,\frac{n}{\sqrt{1-n}}\right)}{\operatorname{erf}\left[\sqrt{\frac{Pe}{2}}\left(\sqrt{1-n} + \frac{n}{\sqrt{1-n}}\right)\right] - \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{Pe}{2}}\,\frac{n}{\sqrt{1-n}}\right)}, \qquad (2)$$

где $T$ – температура, измеренная в толще ледника на расстоянии $y$ от его ложа; $\bar{T}$ – безразмерная температура в толще ледника на глубине $\bar{y} = y/H$, $\bar{T} = (T - T_н)/(T_в - T_н)$; $T_в$ и $T_н$ – температура на верхней и нижней границах ледника соответственно.

Параметры $Pe$ и $n$ определялись подбором до наилучшего совпадения теоретической термограммы с экспериментальной в безразмерном виде. Температура у нижней границы ледника $T_н$ для каждой скважины определялась, ис-

ходя из предположения, что станция Восток, Восток-1 и Пионерская расположены в районе, где мощность ледника больше или равна критической и связана с температурой у нижней границы следующим образом: $T_н = -0{,}69 \cdot 10^{-3} H$ [2].

Скважина № 1-БГ расположена в краевой части ледника, в районе, где при высокой скорости осадконакопления и скорости течения льда на распределение температуры в леднике существенно влияют внутренние источники тепла, образующиеся вследствие выделения тепла при движении ледника. Для интерпретации термограммы, полученной в скважине № 1-БГ, было использовано выражение, позволяющее учитывать влияние источников тепла при условии, что их мощность $q$ постоянна по всей толщине ледника [2]. В этом случае поле температуры в толще ледника

$$\frac{T-T_н}{T_в-T_н} = \frac{\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{Pe}{2}}\,\bar{y}\right)}{\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{Pe}{2}}\right)} - \bar{q}\left[\frac{E\left(\sqrt{\frac{Pe}{2}}\,\bar{y}\right)}{E\left(\sqrt{\frac{Pe}{2}}\right)} - \frac{\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{Pe}{2}}\,\bar{y}\right)}{\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{Pe}{2}}\right)}\right]\frac{2E\left(\sqrt{\frac{Pe}{2}}\right)}{Pe}, \qquad (3)$$

где $\bar{q}$ – безразмерная мощность внутренних источников или стоков тепла, $\bar{q} = qH^2/[\lambda(T_в - T_н)]$; $E(y) = \int_0^y F(y)\,dy$; $F(y)$ – интеграл Досона, табулированный в справочнике [6], $F(y) = e^{-x^2}\int_0^x e^{t^2}dt$.

Наилучшее совпадение расчетной термограммы с экспериментальной для скважин № 1-2бис и № 3Г (станция Восток) было получено при $Pe = 1{,}9$ и $n = 0{,}4$. Необходимо отметить, что разница в значениях безразмерного параметра $T$ между измеренной и расчетной термограммами носит вполне закономерный характер (рис.1). Величина $\Delta\bar{T} = \pm 0{,}0015$ в абсолютных значениях температур соответствует величине $\pm 0{,}07$ °С, т.е. почти в три раза превышает погрешность измерений. Можно предположить, что зафиксированные

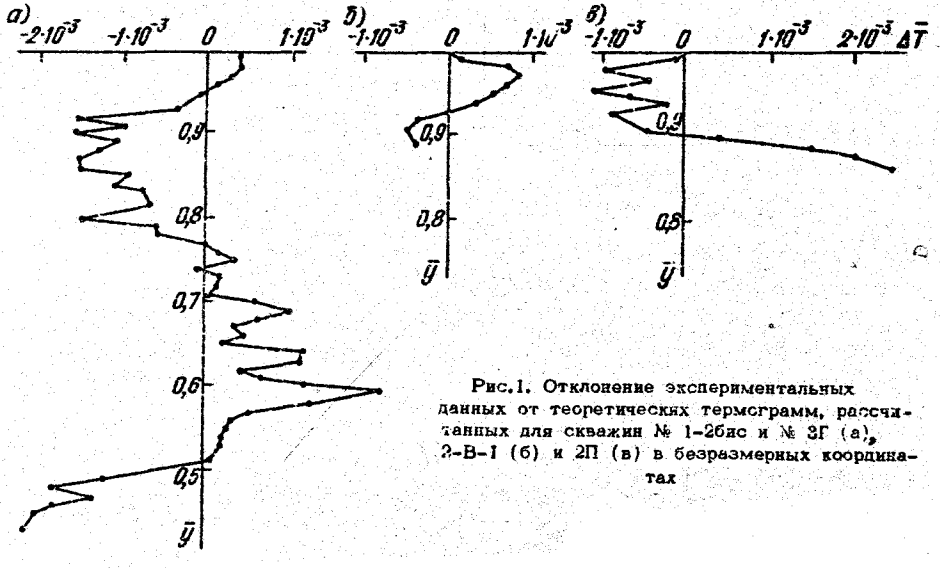



Рис.1. Отклонение экспериментальных данных от теоретических термограмм, рассчитанных для скважин № 1-2бис и № 3Г (а), 2-В-1 (б) и 2П (в) в безразмерных координатах

Таблица 1

Расчетные ($\bar{T}_р$) и экспериментальные ($\bar{T}_э$) значения безразмерной температуры по скважине № 2-В-I (станция Восток-1)

| $\bar{y}$ | $\bar{T}_э$ | $\bar{T}_р$ | $\Delta\bar{T}$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 0,0000 |
| 0,9828 | 0,9986 | 0,9984 | +0,0002 |
| 0,9806 | 0,9983 | 0,9987 | +0,0006 |
| 0,9784 | 0,9989 | 0,9981 | +0,0008 |
| 0,9712 | 0,9982 | 0,9974 | +0,0008 |
| 0,9640 | 0,9973 | 0,9967 | +0,0006 |
| 0,9568 | 0,9967 | 0,9959 | +0,0008 |
| 0,9496 | 0,9956 | 0,9951 | +0,0005 |
| 0,9424 | 0,9949 | 0,9944 | +0,0005 |
| 0,9353 | 0,9936 | 0,9935 | +0,0001 |
| 0,9281 | 0,9920 | 0,9927 | -0,0007 |
| 0,9209 | 0,9914 | 0,9918 | -0,0004 |
| 0,9137 | 0,9905 | 0,9909 | -0,0004 |
| 0,9065 | 0,9894 | 0,9900 | -0,0006 |
| 0,8993 | 0,9885 | 0,9890 | -0,0005 |
| 0,8921 | 0,9876 | 0,9880 | -0,0004 |

Таблица 2

Расчетные ($\bar{T}_р$) и экспериментальные ($\bar{T}_э$) значения безразмерной температуры по скважине № 2П (станция Пионерская)

| $\bar{y}$ | $\bar{T}_э$ | $\bar{T}_р$ | $\Delta\bar{T}$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0,9838 | 0,9987 | 0,9988 | -0,0001 |
| 0,9798 | 0,9963 | 0,9975 | -0,0012 |
| 0,9697 | 0,9957 | 0,9961 | -0,0004 |
| 0,9596 | 0,9936 | 0,9947 | -0,0011 |
| 0,9495 | 0,9925 | 0,9932 | -0,0007 |
| 0,9394 | 0,9914 | 0,9916 | -0,0002 |
| 0,9293 | 0,9890 | 0,9899 | -0,0009 |
| 0,9192 | 0,9874 | 0,9881 | -0,0007 |
| 0,9091 | 0,9858 | 0,9863 | -0,0005 |
| 0,8990 | 0,9847 | 0,9843 | +0,0004 |
| 0,8889 | 0,9839 | 0,9822 | +0,0017 |
| 0,8789 | 0,9823 | 0,9801 | +0,0022 |
| 0,8687 | 0,9823 | 0,9778 | +0,0045 |

отклонения измеренной температуры от плавной (теоретической) кривой связаны как с возможными изменениями физических свойств льда, слагающего толщу ледникового покрова, так и с изменениями температуры на поверхности ледника во времени (палеоклиматическими изменениями), поскольку при расчете теоретической кривой эти параметры принимались постоянными как в пространстве, так и во времени.

Для скважины № 2-В-I (станция Восток-I) наилучшее совпадение расчетных данных с экспериментальными было получено при $Pe = 4{,}8$ и $n = 0{,}5$, а для района станции Пионерская (скважина № 2П) при $Pe = 5{,}6$ и $n = 0$ (рис.I, табл.I и 2). Это вполне согласуется с утверждением, что в этом районе мощность ледника примерно соответствует критической [2], а значит, возможно отсутствие таяния у нижней границы ледника, т.е. $v_н = 0$. Для скважины № 2-В-I отклонение экспериментальной термограммы от теоретической $\Delta\bar{T} \simeq \pm 0{,}0006$, а для скважины № 2П $\Delta T \simeq \pm 0{,}0009$ или в абсолютных значениях $\pm 0{,}03$ и $\pm 0{,}04$ °С, что близко к погрешностям измерений ($\pm 0{,}025$ °С), но закономерный характер их изменения с глубиной, отмеченный в скважинах на станции Восток, сохраняется.

Расчет теоретической термограммы для скважины № I-БГ проводился в соответствии с выражением (3), позволяющим учесть влияние внутренних источников тепла. Наилучшее совпадение теоретической и экспериментальной термограмм получено при $Pe = 8$ и $\bar{q} = 4{,}14$.

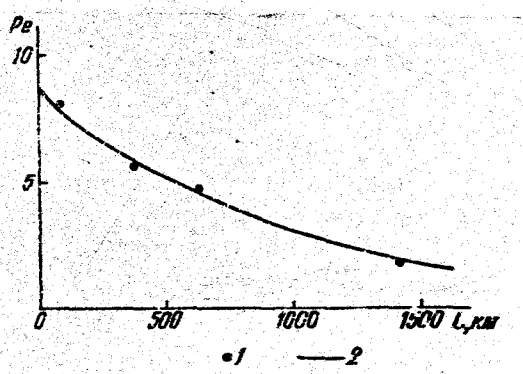



Рис.2. Характер изменения параметра Re вдоль профиля обсерватория Мирный – станция Восток
1 – расчетные значения; 2 – результаты аппроксимации вида $Re = 8{,}855 \exp(-1{,}066 \cdot 10^{-3} L)$, где $L$ – расстояние по профилю, км

Расчеты позволяют проследить динамику изменения параметров Re и $n$ по гляциологическому профилю от обсерватории Мирный до станции Восток (рис.2). В то же время параметр $n$ имеет примерно постоянное значение 0,4–0,5 в центральных областях ледникового покрова и резко падает до нуля в его краевой части, где мощность ледника становится меньше критической.

По полученным значениям Re и $n$ был проведен расчет вертикальной составляющей скорости перемещения льда у поверхности и ложа ледника $v_в$ и $v_н$. При вычислении вертикальных составляющих скорости перемещения льда использовалось значение $a = 1{,}41 \cdot 10^{-6}$ м$^2$/с, которое было получено авторами при измерениях на образцах льда, извлеченного из скважины № 3Г на станции Восток [4].

Для оценки соответствия реальным значениям расчетные данные сопоставлены с данными снегомерных наблюдений по профилю обсерватория Мирный – станция Восток [3, 5]:

| Расстояние по профилю от обсерватории Мирный, км | 73 | 370 | 630 | 1420 |
|---|---|---|---|---|
| Скорость накопления льда по данным, см/год | | | | |
| снегомерных наблюдений | 39,6 | 13,7 | 8,2 | 2,4 |
| термометрии | 36,3 | 12,6 | 7,7 | 2,3 |
| Скорость таяния у ложа по данным термометрии, см/год | – | 0 | 3,8 | 0,93 |

В заключение необходимо отметить, что расчеты позволяют также дать качественную оценку изменчивости критерия Re и параметра $n$ вдоль линии изучаемого профиля, опираясь на фактический материал термометрии скважин. Недостаточная глубина скважин на станциях Восток-I и Пионерская допускает некоторую неоднозначность в определении указанных параметров (см. рис.1), однако полученные значения не сильно искажают плавный ход изменения параметра Re в зависимости от расстояния по профилю (см. рис.2).

Отмеченные интервалы выявленных закономерных отклонений экспериментальных термограмм от расчетных указывают на сложный характер изменения физических свойств льда с глубиной и представляют несомненный интерес при уточнении существующих моделей теплового режима ледниковых покровов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. Блинов К.А., Вострецов Р.Н., Дмитриев Д.Н. Распределение температуры толще ледникового покрова Антарктиды по профилю обс. Мирный – ст. Восток // Материалы гляциологических исследований / Международный геофизический комитет АН СССР. М., 987. Вып. 60. С. 159–163.

2. Зотиков И.А. Тепловой режим ледникового покрова Антарктиды. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 167 с.

3. Липенков В.Я. Некоторые особенности накопления снега на профиле Мирный – осток // Информационный бюллетень САЭ. № 100. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. С. 58–65.

4. Основные результаты геофизических исследований глубоких скважин и ледяного керна Восточной Антарктиде / Р.Н.Вострецов, Д.Н.Дмитриев, О.Ф.Путиков, К.В.Блинов, С.В.Митин // Материалы гляциологических исследований / Международный геофизический комитет АН СССР. М., 1984. Вып. 51. С. 172–178.

5. Плотность ледникового льда и его реологические свойства // А.Н.Савватин, В.Я.Липенков, К.Е.Смирнов, Ю.В.Жилова // Антарктика: Доклады комиссии. Вып. 24. М.: Наука, 1985. С. 94–100.

6. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М.Абрамовица и И.Стиган. М.: Наука, 1979. 830 с.