

# Учет углов наклона дневной поверхности и ложа ледника при проведении радиолокационных исследований. Двумерная модель однослойного ледника

С. В. Попов<sup>1</sup>, В. С. Лучининов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Полярная морская геологоразведочная экспедиция, <sup>2</sup>ГНПП "Севморгео"

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2000 г.

Представлена членом редколлегии Ю.Я. Мачеретом

Описана методика учета углов наклона дневной поверхности и ложа ледника при обработке радиолокационных данных.

При радиолокационном профилировании возникает вопрос об учете углов наклона ложа ледника и дневной поверхности в процессе интерпретации данных. При стандартной методике их обработки (надирный метод) для определения толщины ледникового покрова  $T_M$  в искомой точке измеряется время задержки радиолокационного сигнала между отражениями от дневной поверхности и ложа ледника  $\tau_T$ , которое затем умножается на скорость распространения электромагнитных волн во льду  $v$  и делится пополам [1, 16]:

$$T_M = \frac{1}{2} v \tau_T. \quad (1)$$

Однако это верно только при субгоризонтальном залегании целевых границ (дневной поверхности и ложа ледника). В общем случае, как следует из рис. 1, отражение происходит под углом  $\alpha$ , отличным от нуля. Методика обработки радиолокационных материалов с целью построения неискаженного рельефа отражающих границ была предложена в общем виде Харрисоном [14, 15] и В.С. Лучининовым [4] и описана для ряда частных случаев в [2, 12, 16]. Как было показано в [7], применительно к радиолокационному профилированию можно использовать процедуру "Миграция", применяемую в обработке сейсмических материалов [11].

Рассмотрим радиолокационную запись, на которой зарегистрированы отражения от дневной поверхности (в случае аэро-радиолокационных исследований) и от ложа ледника, а также отметка зондирующего сигнала. Предположим, что высота дневной поверхности  $S(x)$  известна в каждой точке. По полученным материалам рассчитана толщина ледникового покрова по стандартной методике. Требуется откорректировать значения с учетом углов наклона ложа ледника  $\theta$  и дневной поверхности  $\gamma$ . Все вычисления будем проводить для двумерной модели.

Рассмотрим рис. 1. Пусть  $x_i$  — абсцисса положения носителя,  $n$  — коэффициент преломления льда,  $\tilde{x}_i$  — абсцисса точки преломления электромагнитной волны на границе раздела сред лед-воздух,  $\tau_S$  — суммарная задержка отраженного сигнала от ложа,  $\tau_E$  — время задержки между зондирующим сигналом и отражением от дневной поверхности. Остальные параметры понятны из рисунка. Выпишем основные уравнения:

$$\begin{aligned} \tau_S &= \tau_1 + \tau_2 = \tau_E + \tau_T, \quad \sin \alpha' = n \sin \beta, \quad H = H_G \cos \gamma, \\ \tau_1 &= 2 \frac{R_1}{c}, \quad \tau_2 = 2 \frac{n R_2}{c}, \quad \tau_E = 2 \frac{H}{c}, \quad \tau_T = 2 \frac{n T_M}{c}, \\ R_1 &= \frac{\tilde{H}}{\cos \alpha}, \quad R_2 = \frac{1}{n} \left( H_G \cos \gamma + n T_M - \frac{H_G \cos \gamma}{\cos(\alpha - \gamma)} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Ввиду важности первого выражения в (2), где приравниваются суммарные задержки радиолокационного сигнала для обеих моделей, остановимся на нем подробнее. Для наклонной модели (левая часть второго равенства) оно понятно из рис. 1; рассмотрим вторую часть этого выражения (надирный метод).

Предполагается, что время распространения радиолокационного импульса в воздухе равно задержке между зондирующим импульсом и отражением от дневной поверхности, а время распространения радиолокационного импульса в леднике равно задержке между отражениями от дневной поверхности и нижней кромкой ледника. Однако это совершенно разные пути распространения. В надирном методе предполагается, что сигнал распространяется к целевым границам (дневной поверхности и ложу ледника);  $\tau_T$  — некоторое значение, полученное из (1).

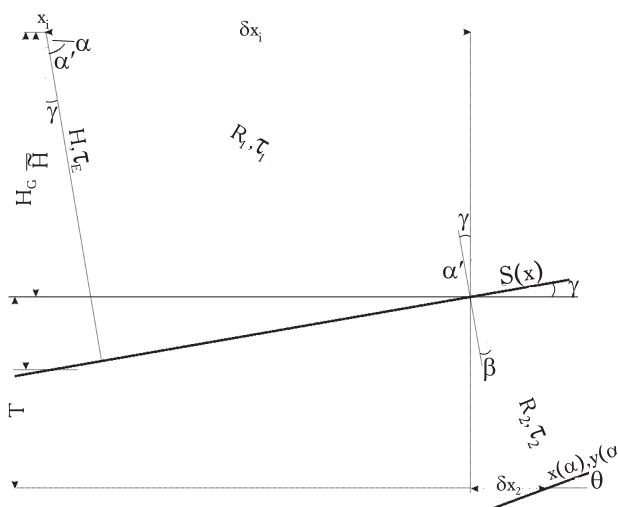


Рис. 1. Схема распространения электромагнитной волны. Обозначения и пояснения в тексте  
Fig. 1. Scheme of radio wave propagation. See notations in text

Найдем абсциссу точки отражения от нижней кромки ледника  $x(\alpha)$  :

$$x(\alpha) = x_i + \delta x_1 + \delta x_2, \quad x(\alpha) = R_1 \sin \alpha + R_2 \sin \theta,$$

$$x(\alpha) = x_i + \sin \alpha \frac{H_G \cos \gamma}{\cos(\alpha - \gamma)} + \frac{1}{n^2} \left( H_G \cos \gamma + n T_M - \frac{H_G \cos \gamma}{\cos(\alpha - \gamma)} \right) \times$$

$$\times \left( \sin \gamma \sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha - \gamma)} + \cos \gamma \sin(\alpha - \gamma) \right). \quad (3)$$

Далее, найдем ординату точки отражения от нижней кромки ледника  $y(\alpha)$  :

$$y(\alpha) = \tilde{H} + T, \quad y(\alpha) = R_1 \cos \alpha + R_2 \cos \theta,$$

$$y(\alpha) = \cos \alpha \frac{H_G \cos \gamma}{\cos(\alpha - \gamma)} + \frac{1}{n^2} \left( H_G \cos \gamma + n T_M - \frac{H_G \cos \gamma}{\cos(\alpha - \gamma)} \right) \times$$

$$\times \left( \cos \gamma \sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha - \gamma)} - \sin \gamma \sin(\alpha - \gamma) \right). \quad (4)$$

При проведении наземных радиолокационных исследований ( $\gamma = 0$ ,  $H_G = 0$ ), (3) и (4) преобразуются в:

$$x(\alpha) = x_i + \frac{T_M}{n} \sin \alpha, \quad y(\alpha) = \frac{T_M}{n} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}. \quad (5)$$

Анализ (5) приводит к тривиальному выводу, что точка отражения располагается на окружности радиуса  $T_M$ .

Таким образом, мы получили параметрическое уравнение, описывающее положение кривой, на которой должна располагаться точка отражения. Огибающая этих кривых будет истинной высотой нижней кромки ледника по маршруту.

Оценим точность стандартной методики по отношению к предлагаемой в зависимости от углов наклона ложа ледника  $\theta$  и дневной поверхности  $\gamma$ . Для этого сначала выполним преобразование от  $\alpha$  к  $\theta$ . Тогда (3) и (4) следует переписать с учетом (2):

$$x(\theta) = x_i + \frac{H_G \cos \gamma}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\theta - \gamma)}} \times$$

$$\times \left( n \sin(\theta - \gamma) \cos \gamma + \sin \gamma \sqrt{1 - n^2 \sin^2(\theta - \gamma)} \right) +$$

$$+ \frac{\sin \theta}{n} \left( H_G \cos \gamma + n T_M - \frac{H_G \cos \gamma}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\theta - \gamma)}} \right);$$

$$y(\theta) = \frac{H_G \cos \gamma}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\theta - \gamma)}} \times$$

$$\times \left( \cos \gamma \sqrt{1 - n^2 \sin^2(\theta - \gamma)} - n \sin(\theta - \gamma) \sin \gamma \right) +$$

$$+ \frac{\cos \theta}{n} \left( H_G \cos \gamma + n T_M - \frac{H_G \cos \gamma}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\theta - \gamma)}} \right).$$

Величина латерального сноса точки отражения от нижней кромки ледника равна:

$$dX = x(\theta) - x_i = \frac{H_G \cos \gamma}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\theta - \gamma)}} \times$$

$$\times \left( n \sin(\theta - \gamma) \cos \gamma + \sin \gamma \sqrt{1 - n^2 \sin^2(\theta - \gamma)} \right) +$$

$$+ \frac{\sin \theta}{n} \left( H_G \cos \gamma + n T_M - \frac{H_G \cos \gamma}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\theta - \gamma)}} \right). \quad (6)$$

Оценим расхождение в определении толщины ледникового покрова  $dT$  “надирным” методом и предлагаемым методом. При этом учтем тот факт, что реальная точка отражения находится на расстоянии  $dX$  от положения носителя в плане. Если предположить, что на расстояниях порядка  $dX$  углы наклона ложа ледника и дневной поверхности сохраняются, что весьма логично, то:

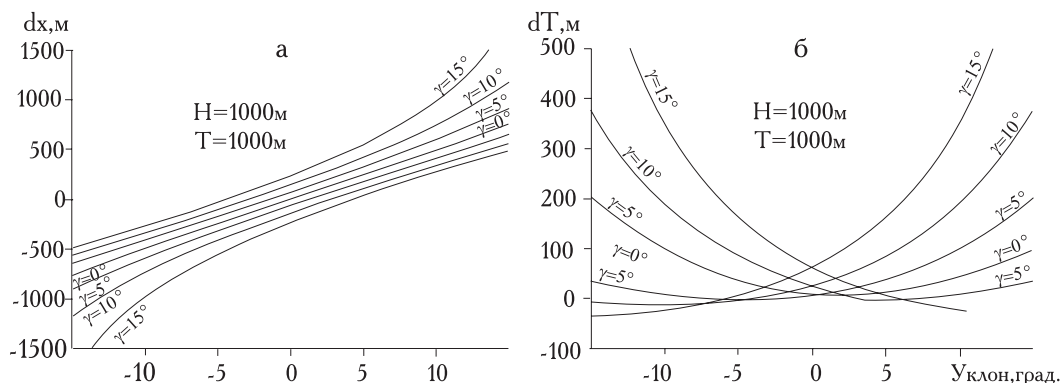


Рис. 2. Латеральный снос точки отражения по отношению к положению носителя (а) и разность толщины ледникового покрова между рассмотренными моделями (б) в зависимости от угла наклона ложа ледника при разных углах наклона дневной поверхности. Относительная высота полета носителя 1000 м. Толщина ледникового покрова 1000 м. Обозначения в тексте

Fig. 2. Lateral drift of the reflection points referenced to carrier position (a) and the thickness differences between the models (b) depends on bed slope. Relative height of the survey and ice thickness are 1000 m. Ice sheet thickness is 1000 m. See notations in text

$$dT = y(\theta) - H_G - T_M + dX \operatorname{tg} \theta,$$

$$dT = \frac{H_G \cos \gamma}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 (\theta - \gamma)}} \left( \cos \gamma \sqrt{1 - n^2 \sin^2 (\theta - \gamma)} - n \sin (\theta - \gamma) \sin \gamma \right) +$$

$$+ \frac{\cos \theta}{n} \left( H_G \cos \gamma + n T_M - \frac{H_G \cos \gamma}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 (\theta - \gamma)}} \right) - H_G - T_M + dX \operatorname{tg} \theta. \quad (7)$$

На рис. 2 приведены зависимости латерального сноса точки отражения и расхождения в определении толщины ледникового покрова в зависимости от угла наклона ложа ледника при разных углах наклона дневной поверхности. Вычисления выполнены при  $H_G = 1000$  м,  $T_M = 1000$  м. Здесь и далее  $n = 1,78$ .

Рассмотрим два частных случая. Предположим, что носитель движется над субгоризонтальной поверхностью ( $\gamma = 0$ ), что возможно при проведении аэрорадиолокационных исследований над шельфовыми ледниками или в центральных районах Антарктиды. Тогда уравнения (6) и (7) примут вид:

$$dX = \frac{n H_G \sin \theta}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \theta}} + \frac{\sin \theta}{n} \left( H_G + n T_M - \frac{H_G}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \theta}} \right);$$

$$dT = H_G + \frac{\cos \theta}{n} \left( H_G + n T_M - \frac{H_G}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \theta}} \right).$$

На рис. 3 приведены зависимости латерального сноса точки отражения и расхождения в определении толщины ледникового покрова (рис. 4) в зависимости от угла наклона ложа ледника при разных значениях  $H_G$  и  $T_M$ .

Насколько актуально использование описанной модели? Для ответа на этот вопрос дадим гляциоморфологическую характеристику Антарктиды и арктических островов. Согласно классификации [9], на Земле Франца-Иосифа выделяются три морфологических типа оледенения: ледники плато (ледниковые купола и щиты), ледники долин и малые ледники. Привершинные поверхности ледников плато почти горизонтальны. На периферии они достигают уклонов  $5 - 6^\circ$  и более [9]. Однако это касается куполов и щитов, которые лежат на нерасчлененном ложе. Такую форму имеют ледники сравнительно небольшого числа островов. Большинство же других тесно связаны с многочисленными долинными ледниками и расчленены пологими депрессиями, глубокими цирками. При этом крутизна склонов резко возрастает. Горно-долинные ледники архипелага берут свое начало в крутосклонных цирках. Углы наклона достигают  $15 - 17^\circ$  и более [9]. Малые ледники существенно уступают в размерах перечисленным. Их линейные размеры не превосходят нескольких километров при уклонах поверхности  $13 - 35^\circ$  [9]. Толщина ледников архипелага в среднем составляет  $300 - 500$  м, а уклоны коренного рельефа могут достигать  $10^\circ$  и более [3, 8, 13]. Характеристики ледников и их ложа для остальных архипелагов российского сектора Арктики сходны [3, 5, 6, 10, 17, 18], во всяком случае, этого достаточно для оценки погрешности модели. Для антарктического ледника цифры, полученные для дневной поверхности, сходны, но его толщина в некоторых частях превышает  $4000$  м [1].

Таким образом, для ледников российского сектора Арктики при проведении аэрогеофизической

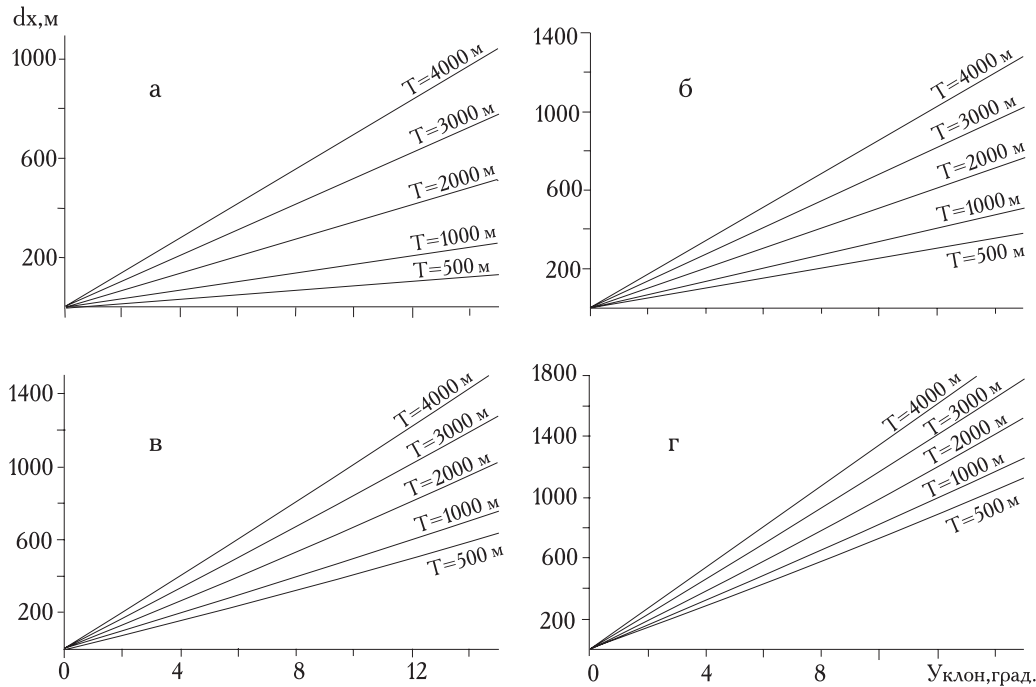


Рис. 3. Латеральный снос точки отражения по отношению к положению носителя в зависимости от угла наклона ложа ледника при радиовысотах: а — 0 м, б — 500 м, в — 1000 м, г — 2000 м. Обозначения в тексте  
Fig. 3. Lateral drift of the reflection points referenced to carrier position depends from bed slope for radio altitude: а — 0 м, б — 500 м, в — 1000 м, г — 2000 м. See notations in text

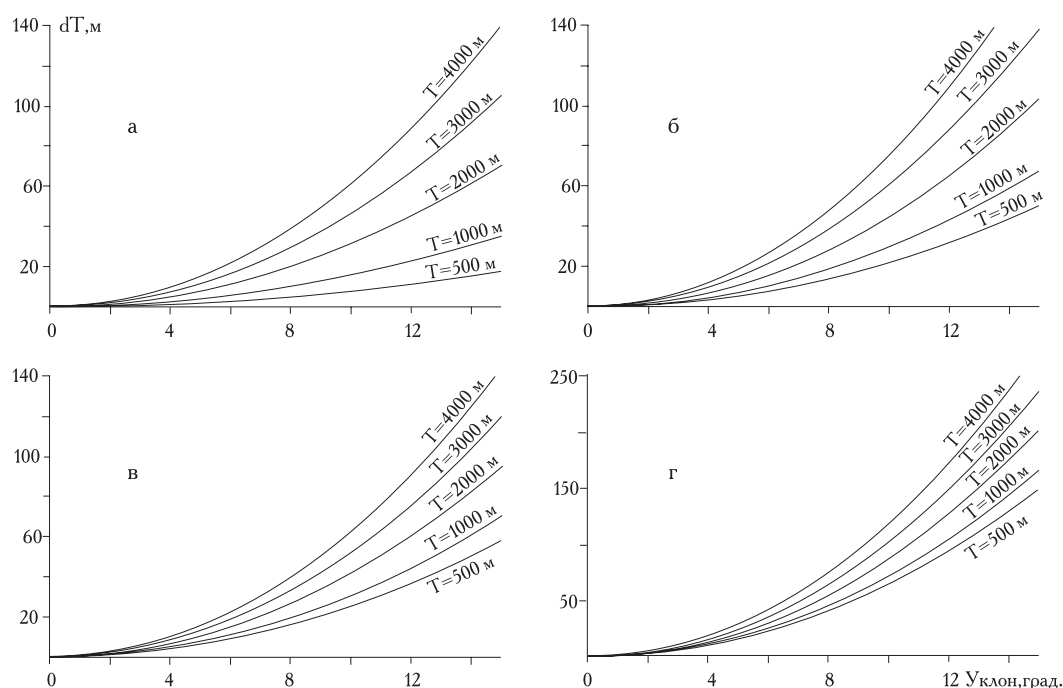


Рис. 4. Разность толщины ледникового покрова, полученная по рассмотренным моделям в зависимости от угла наклона ложа ледника при радиовысотах: а — 0 м, б — 500 м, в — 1000 м, г — 2000 м. Обозначения в тексте  
Fig. 4. Ice thickness differences between the models depends on bed slope for radio altitude. : а — 0 м, б — 500 м, в — 1000 м, г — 2000 м. See notations in text

съемки на относительной высоте 500 м латеральный снос точки отражения может превышать 500 м, а разность результатов по разным моделям достигать 200 м. Для антарктического ледника эти цифры возрастают и могут превышать упомянутые выше в 1,5 раза и более.

В заключение представим результаты моделирования. На рис. 5 изображен модельный рельеф коренного ложа (толстая линия), перекрытый ледником. Дневная поверхность горизонтальна и ее абсолютная высота равна нулю. Проводится наземное радиолокационное профилирование. По синтезированной радиолокационной киноленте (растровому изоб-

ражению, построенному компьютером), с использованием стандартной методики обработки (1) были проведены расчеты и построен подледный рельеф, показанный на рис. 5 тонкой линией. На рис. 6 нанесены линии (каждая двадцатая), построенные по уравнениям (5), и поставлены точки, соответствующие моделируемому рельефу коренного ложа (каждая двадцатая). Как видно из рисунков, стандартная методика обработки приводит к существенным ошибкам при построении сильно расчлененного рельефа, однако огибающая, построенная по уравнениям (2) — (4), хорошо описывает модельный рельеф, даже при значительных уклонах его поверхности.

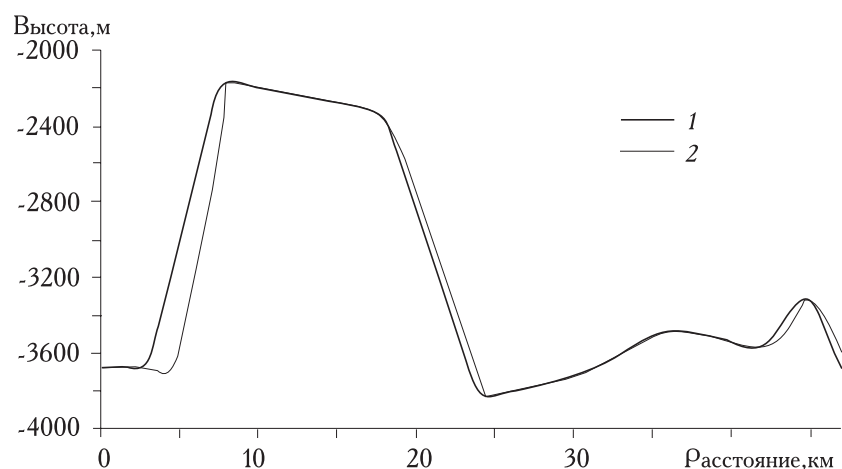


Рис. 5. Сравнение моделей: 1 — исходный модельный ледник, 2 — результат обработки по стандартной методике. Пояснения в тексте  
Fig. 5. The models comparison: 1 — native model glacier, 2 — standard processing result. See notations in text

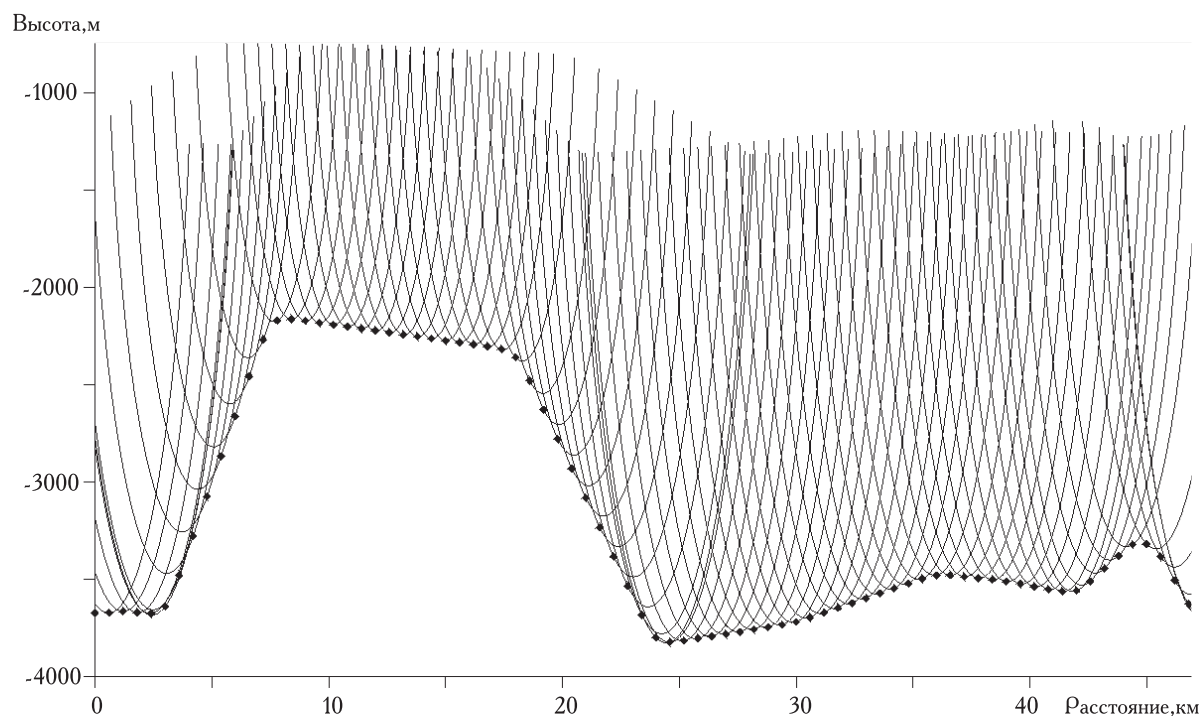


Рис. 6. Сравнение моделей. Линии, построенные по уравнению (5) и модельный рельеф (точки). Вертикальный масштаб увеличен в 10 раз

Fig. 6. The model comparison. Lines are from equation (5). Diamonds are native model relief points. Vertical scale is enlarged by 10 times

В заключение авторы приносят благодарность А.В. Мионову, А.Н. Шереметьеву, Г.А. Кудрявцеву, В.Н. Масолову, О.Б. Соболевой за конструктивную критику и помощь в написании статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богородский В.В., Бентли Ч.Р., Гудмандсен П. Радиогляциология. Л., ГИМИЗ, 1983, 312 с.
2. Василенко Е.В., Громыко А.Н., Константинова Т.Н. и др. Радиолокационная съемка ледника Абрамова низкочастотным локатором. — МГИ, вып. 64, 1988, с. 174-182.
3. Леонов В.О., Попов С.В. Коренной рельеф Земли Франца-Иосифа по данным радиолокационного и магнитного зондирования. — МГИ, вып. 82, 1997, с. 208-212.
4. Лучининов В.С. Радиолокационное зондирование и его применение в гляциологии. Итоги науки и техники. Гляциология. М., ВИНТИ, 1977, с. 87-192.
5. Мачерет Ю.Я. Некоторые результаты радиолокационного зондирования ледников Западного Шпицбергена в 1974 г. — МГИ, вып. 26, 1976, с. 158-164.
6. Мачерет Ю.Я., Василенко Е.В. Особенности внутреннего строения и режима ледников Северо-Восточной Земли по данным аэроаудиозондирования. — МГИ, вып. 63, 1988, с. 44-56.
7. Мачерет Ю.Я., Василенко Е.В., Глазовский А.Ф. и др. Радиофизические исследования ледника Альдегона на Шпицбергене в 1999 г. — См. на- стоящий сборник
8. Мачерет Ю.Я., Синькевич С.А., Боброва Л.И., Санкина Л.В. Толщина и гидротермическое состояние ледникового купола Лунный на Земле Франца-Иосифа по данным радиозондирования. — МГИ, вып. 77, 1993, с. 97-104.
9. Оледенение Земли Франца-Иосифа. М., "Наука", 1973, 352 с.
10. Семенов И.В. Морфология ледников Северной Земли. — Тр. ААНИИ, т. 367, 1981, с. 9-20.
11. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка, т. 1. М., "Мир", 1987, 400 с.
12. Berry M.V. Theory of radio echo from glacier beds. — Journ. of Glaciology, v. 15, N 73, 1975, p. 65-74.
13. Dowdeswell J.A., Gorman M.R., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y. Airborne radio-echo sounding of the ice caps on Franz Josef Land in 1994. — МГИ, вып. 80, 1996, с. 248-255.
14. Harrison C.H. Radio propagation effects in glaciers. Diss. Doct. Phys. Univ. Cambridge, Clare Coll., 1972, 193 p.
15. Harrison C.H. Radio echo sounding of horizontal layers in ice. — Journ. of Glaciology, v. 12, N 66, 1973, p. 383-397.
16. Macheret Yu.Ya., Moskalevsky M.Yu., Simoes J.C., Ladouch L. Radio echo-sounding of King George Island ice cap, South Shetland Islands, Antarctica. — МГИ, вып. 83, 1997, p. 121-128.

17. Popov S.V., Larin S.M., Luchininov V.S. Main results of RES investigations on Akademii Nauk glacier (Komsomolets isl., Severnaya Zemlya). — Key problems of the geology of the Barents-Kara shelf and adjacent land. International workshop, St. Petersburg, February 13-17, 1997, p. 44-45.
18. Serov Je.K., Popov S.V. Map of subglacial relief of archipelago Franz Josef Land. — Key problems of the geology of the Barents-Kara shelf and adjacent land. International workshop, St. Petersburg, February 13-17, 1997, p. 48-49.

## **SUMMARY**

Account of the ice surface and bedrock slopes are discussed in the paper for interpretation RES data. One-layer model is examined. Lateral drift and ice thickness of the reflection point depends from ice surface and bedrock slopes and estimates ice thickness, which countered, based on standard methodic are deduced. The authors propose RES data corrections based to analysis of reflection curves envelope. Equations and graphs show reasons using the method.