

УДК 523.164.8

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВЫСОТОМЕРОВ АМС «ВЕНЕРА-15, 16»

*А. В. Абрамов, А. Ф. Богомолов, А. В. Грецищев,
Н. В. Жерихин, И. А. Желтиков, В. Ф. Зайцев,
Г. М. Левченко, А. А. Морозов*

Обсуждаются алгоритмы обработки радиовысотомерной информации, полученной в ходе эксперимента с советскими автоматическими межпланетными станциями (АМС) «Венера-15, 16». Показано, что разрешающая способность вдоль трассы полета при измерении высоты имеет величину порядка 10 км, а среднеквадратичные ошибки измерений расстояния от АМС до поверхности планеты находятся в пределах 30—70 м. Предлагается методика уточнения траекторных параметров по данным высотомеров АМС. Использование этой методики позволило получить результирующую точность измерений высот порядка 100 м. В качестве иллюстрации приводится гипсометрическая карта северной области Венеры.

В ноябре 1983 — июле 1984 г. с помощью советских автоматических межпланетных станций (АМС) «Венера-15, 16» была проведена радиолокационная съемка северной полярной области планеты Венера [1, 2]. Орбита станций имела сильно вытянутую форму. Минимальное удаление от поверхности составляло величину порядка 1000 км, а максимальное — около 67000 км. Период обращения АМС был равен 24 часам, наклонение орбиты — 87° . За один сеанс съемки исследовался участок длиной более 7500 км, начинавшийся на $70\text{--}80^\circ$ с. ш., проходивший через район полюса и заканчивающийся на $20\text{--}30^\circ$ с. ш. На рабочем участке орбиты расстояние от станций до поверхности изменялось в пределах 1000—1500 км, чем объясняются некоторые различия в условиях съемки. Венера совершает оборот вокруг своей оси за 243 земных дня. За сутки, проходившие между двумя последовательными сеансами, планета поворачивалась на угол $1,5^\circ$ и спутники изучали соседний участок поверхности. Всего было проведено более 260 сеансов высотомерной съемки, и получена информация о высотах в области площадью около $115 \cdot 10^6$ км², лежащей выше $20\text{--}30^\circ$ с. ш., исключая лишь самый северный район, расположенный выше 87° с. ш.

На борту каждой АМС работали по два независимых комплекта высотомерной аппаратуры, использующие одну и ту же антенну на прием и передачу. Каждый комплект излучал зондирующие послышки с периодом $T_n = 0,6$ с, послышки разных комплектов были разнесены между собой на 0,3 с.

Сигнал был манипулирован по фазе 31-элементным М-кодом с длительностью одного дискрета $\tau_u = 1,5$ мкс. Принятое после отражения от поверхности колебание содержало 14 циклов М-кода (один кадр высотомерной информации), оцифровывалось на выходе квадратурных детекторов в четыре двоичных разряда с периодом, равным длительности дискрета кода, записывалось в бортовое запоминающее устройство и передавалось на Землю для дальнейшей обработки. В одном сеансе получали более 1600 кадров от каждого комплекта.

Параметры зондирующего сигнала были выбраны с учетом возможности построения алгоритмов обработки высотомерной информации с синтезом апертуры вдоль трассы полета. Обозначим λ — длину волны зондирующего сигнала, v — абсолютную величину вектора скорости

АМС, α и β — углы между направлением визирования и, соответственно, вектором скорости и вертикалью к поверхности. Величину доплеровского смещения частоты в принятом колебании F можно оценить по формуле

$$F = (2v/\lambda) \cos \alpha. \quad (1)$$

Радиальная v_r и тангенциальная v_u компоненты вектора скорости в произвольной точке орбиты вычисляются согласно [3] по формулам

$$v_r = \sqrt{(\mu/a) \cdot (1-e^2)} e \sin \Theta, \quad v_u = \sqrt{(\mu/a) (1-e^2)} (1-e \cos \Theta). \quad (2)$$

Здесь μ — гравитационный параметр Венеры, a — большая полуось орбиты, e — эксцентриситет, Θ — истинная аномалия. Соответствующие иллюстрации даны на рис. 1. Оценим максимальную величину доплеровского смещения $F_{\max}$ для различных участков съемки. В перигентре $\Theta=0$,

$v_r=0$, $\alpha=90^\circ-\beta$. Обозначим эффективную ширину диаграммы направленности (ДН) приемно-передающей антенны высотомера (по уровню 0,5) — $\Delta\beta$. Учитывая, что $\lambda=8$ см, $\mu=324858,6$ км³/с² [4], $a=4 \cdot 10^4$ км, $e=0,82$, $\beta=\Delta\beta/2=2^\circ$, по формулам (1) и (2) находим $v=9,05$ км/с, $F_{\max}=7,9$ кГц. Диапазон частотных смещений в пределах всей ДН при этом можно рассчитать как: $\Delta F=2F_{\max}$. В данном случае $\Delta F=15,8$ кГц. На участках орбиты, удаленных от перигентра, $\Theta \neq 0$, и при расчетах ΔF необходимо

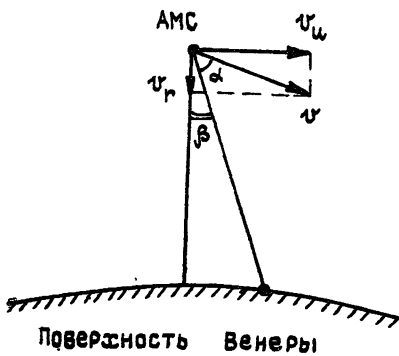


Рис. 1.

учитывать радиальную составляющую вектора скорости v_r . Однако в пределах рабочего участка, когда Θ изменяется в пределах от -20° до 20° , величина ΔF меняется незначительно.

Потенциальную разрешающую способность вдоль трассы полета можно определить, если записать выражение для сечения функции неопределенности высотомерной посылки, состоящей из L модулирующих импульсов, вдоль частотной оси [5]:

$$Y(f) = \sin(\pi f \tau_u L) / \pi f \tau_u L. \quad (3)$$

Ограничивая ширину главного максимума $Y(f)$ величиной 0,5 и учитывая, что $L=434$ (14 циклов 31-элементного кода), из выражения (3) находим $Y(f_p)=0,5$, $f_p=0,925$ кГц. Поскольку $\Delta f=2f_p$, то $\Delta f=1,85$ кГц.

Таким образом, видно, что диапазон доплеровских смещений ΔF примерно в восемь раз превышает разрешающую способность по частоте Δf . Следовательно, из одного кадра высотомерной информации можно выделить несколько составляющих сигнала с различным доплеровским смещением. Они соответствуют отражениям зондирующей посылки от различных полос поверхности, вытянутых перпендикулярно трассе полета.

Обрабатывая каждую такую составляющую, можно вычислить среднюю высоту поверхности в полосе. Для того, чтобы не было потерь высотомерной информации, полосы должны, по крайней мере, примыкать одна к другой.

При обработке оказалось удобным привязывать измерения высоты к подспутниковым точкам в момент излучения зондирующего сигнала первым комплектом аппаратуры. В принятой посылке выделялась 21-частотная полоса шириной $\Delta f=1,85$ кГц. Середина центральной полосы соответствовала направлению на подспутниковую точку АМС для данного кадра, а остальные содержали информацию о высоте в 10 предыдущих и 10 последующих кадрах. Возможные отклонения антен-

ны высотомера от вертикали учитывались по данным АПЧ. Для каждой частотной составляющей вычислялась функция корреляции запросного и принятого колебания. Затем находилось превышение этой функцией некоторого фиксированного порога, выбранного в 3—4 раза больше уровня шумов. По задержке момента превышения порога относительно времени излучения посылки определялось расстояние от АМС до поверхности H_z . При этом вводились поправки на изменение скорости распространения радиоволн в атмосфере Венеры и на неперпендикулярность направления зондирования во всех частотных полосах кроме центральной. Из траекторных данных вычислялось удаление АМС от центра масс планеты ρ . Вычитая H_z из ρ , находили высоту в данной точке поверхности. Результат получали усреднением 21 измерения высоты, проводимого для каждой точки. Кроме того, использовались данные о высоте, полученные в двух комплектах аппаратуры высотомеров. После обработки всех кадров сеанса строился профиль поверхности вдоль трассы полета. Пример такого расчета дан на рис. 2.

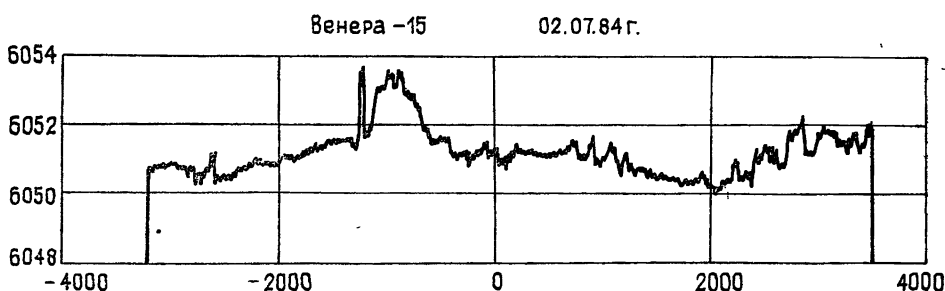


Рис. 2.

Здесь представлены результаты измерений высоты поверхности планеты вдоль трассы полета АМС «Венера-15» во время сеанса съемки 02.07.84 г. По горизонтальной оси отложено расстояние по поверхности вдоль трассы полета относительно перигелия орбиты. По вертикали отмечены расстояния от центра Венеры. Все величины имеют размерность км. Самое крупное горное образование на этом рисунке — Область Метиды — располагается примерно в 1000 км от перигелия орбиты. Среднее разрешение вдоль трассы полета — 10 км. Результирующая среднеквадратичная погрешность измерений высоты оценивалась по различиям показаний двух независимых комплектов аппаратуры и для различных сеансов имела величину от 30 до 70 м.

В силу того, что плоскость орбиты составляла с осью вращения планеты угол 3° , подспутниковые следы многих сеансов пересекались между собой. Значения высоты в точке пересечения, измеренные в разных сеансах, должны быть близки. Однако первоначально оказалось, что в этих точках невязки измерений могут достигать 2 км. Это объяснялось недостаточной точностью траекторных измерений.

Параметры орбиты измерялись с Земли доплеровским методом. Примерно в середине эксперимента (март 1984 г.) плоскость орбиты АМС была почти перпендикулярна линии визирования с Земли, что обусловило низкую точность траекторных измерений. Поэтому оказалось необходимым уточнить траекторные данные на основе высотомерных измерений.

Из шести параметров, описывающих движение АМС на орбите [3], три являются угловыми. Они определяют положение плоскости и перигелия орбиты и не влияют на удаление спутника от поверхности. Величина большой полуоси a мало влияет на удаление АМС от поверхности в рабочей области, близкой к перигелию, и известна с достаточной точностью. Наибольшее влияние на измерение высоты оказывает величина эксцентриситета e и время прохождения перигелия τ . Эксцентриситет задает форму орбиты, и погрешность в его определении выра-

жается в отклонении полученного профиля от истинного на практически постоянную величину за время одного сеанса. Параметр τ дает временную привязку нахождения АМС на орбите. Из-за неточности определения τ разность между полученным и истинным профилем является почти линейной функцией времени. Для этих двух параметров и была предложена методика уточнения траекторных данных при помощи измерений высоты.

Из всех сеансов была выделена опорная серия, относящаяся к началу работы с АМС (ноябрь, декабрь 1983 г), в которой параметры измерялись достаточно точно. Для уточнения e и τ остальных сеансов была применена процедура оптимальной нелинейной фильтрации [6]. Для построения алгоритма при этом использовался расширенный дискретный фильтр Калмана.

Разница высот в точках пересечения подспутниковых следов сеансов $\Delta\rho$ не превосходила 2 км. Такую точность вычисления дает изменение эксцентриситета или времени прохождения перигея на относительную величину порядка 10^{-4} . Поэтому можно оценивать не сами значения параметров e и τ , а поправки к ним Δe и $\Delta\tau$. Таким образом, вектор сообщения имел вид $X = [\Delta e, \Delta\tau]^T$, где «т» — символ транспонирования.

Считалось, что оцениваемые параметры являются регулярными функциями, т. е. не содержат шумов сообщения, и не изменяются за время проведения сеанса съемки. Модель сообщения записывалась при этом в виде $X(k+1) = X(k)$, причем k — номер такта работы фильтра Калмана.

Так как вектор сообщения двумерный, а наблюдалась скалярная величина, то существовали некоторые трудности с заданием начальных условий в фильтре. Кроме того, в тех случаях, когда число точек пересечений невелико, для эффективной сходимости алгоритма необходимо, чтобы наблюдения были значительно разнесены по их положению на поверхности планеты. Поэтому использовался двумерный вектор z в модели наблюдений. Одной его компонентой были значения из первой половины массива невязок измерений, другой — из второй. Применяя индекс $N/2 + k$ для обозначения k -й точки из второй половины массива, можно записать $z = [\Delta\rho_k, \Delta\rho_{N/2+k}]^T + v(k)$. Здесь N — максимальное четное число, не превосходящее по величине количества точек в массиве невязок данного сеанса, $v(k)$ — двумерный вектор шумов наблюдения, имеющих интенсивность V_v .

При нахождении зависимости $\Delta\rho(\Delta e, \Delta\tau)$ необходимо использовать формулы, описывающие кеплеровское движение космического аппарата [3]:

$$M = \sqrt{\mu/a^3} (t - \tau); \quad (4)$$

$$E - e \sin M = M; \quad (5)$$

$$\rho = a(1 - e \cos E), \quad (6)$$

где M — средняя, а E — эксцентрическая аномалия, t — текущее время.

Если дать приращения Δe и $\Delta\tau$ величинам e и τ и разложить нелинейные функции в ряд по степеням Δe и $\Delta\tau$, то из (4)–(6) следует

$$\Delta\rho = a \left(\frac{\Delta e \sin E - \Delta\tau \sqrt{\mu/a^3}}{1 - e \cos E} e \sin E + \Delta e \cos E \right). \quad (7)$$

Поскольку Δe и $\Delta\tau$ малы, в выражении (7) учтены лишь члены первого порядка малости. Используя приведенные выше соотношения, можно записать выражения, описывающие расширенный дискретный фильтр Калмана:

$$V_x(k+1) = V_x(k) + V_x(k) H^T(k) [H(k) V_x(k) H^T(k) + I] H(k) V_x(k); \quad (8)$$

$$K(k+1) = V_x(k+1) H^T(k); \quad (9)$$

$$\hat{X}(k+1) = \hat{X}(k) + K(k+1) \{Z(k+1) - h[\hat{X}(k+1), k+1]\}. \quad (10)$$

В формулах (8)—(10) обозначено: $V_x(k)$ — ковариационная матрица ошибок, нормированная к величине V_v , $K(k)$ — коэффициент усиления фильтра, $\hat{X}$ — оценка вектора состояния, I — единичная матрица размером 2×2 , а

$$H(k) = \frac{\partial h[\hat{X}(k), k]}{\partial \hat{X}(k)}, \quad h[\hat{X}(k), k] = [\Delta p_k(\hat{X}(k)), \Delta p_{N/2+k}(\hat{X}(k))]^T.$$

Матрица начальных значений $v_x(0)$ оцениваемых параметров находится из условий априорной неопределенности, которые соответствуют ошибкам в определении e порядка $5 \cdot 10^{-5}$ и погрешностям вычислений τ порядка 2 с.

В ходе первой итерации уточнение траекторных параметров при помощи соотношений (8)—(10) проводилось последовательно для групп сеансов, расположенных друг за другом. При этом каждая уточненная группа присоединялась к опорной серии. В последующих девяти итерациях уточнялись параметры e и τ всех сеансов по всем взаимным невязкам измерений. Результирующую точность оценок высоты с учетом погрешностей траекторных измерений можно характеризовать среднеквадратической величиной невязок измерений во всех точках пересечений подспутниковых следов, которая после использования данной методики составила величину порядка 100 м.

Для получения двумерной карты высот северной приполярной области Венеры было необходимо интерполировать данные о высоте в подспутниковых точках на участки, не охваченные измерениями. Расстояния между линиями измерений высоты при этом изменялись для двух соседних сеансов измерений от нуля (в точке пересечения подспутниковых следов) до 150 км (в конце сеансов). Алгоритм интерполяции иллюстрирован на рис. 3. Точка O находится на пересечении следов сеансов. Высота H_C в точке C , находящейся на расстоянии r_1 от первого сеанса и r_2 от второго, рассчитывается по формуле

$$H_C = (H_A r_2 + H_B r_1) / (r_1 + r_2). \quad (11)$$

Величины H_A и H_B в выражении (11) вычисляются как средние на отрезках $A_1 A_2$ и $B_1 B_2$ соответственно. Причем длины этих отрезков равны сумме $r_1 + r_2$.

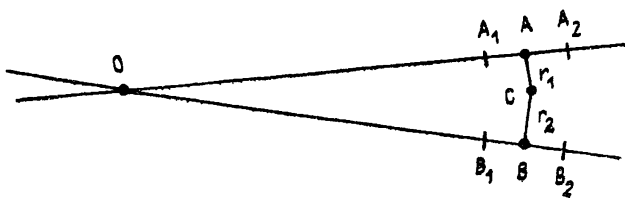


Рис. 3.

Такой подход при интерполяции приводит к тому, что в приполярных областях отсчеты высоты соответствуют среднему значению высоты участка поверхности площадью примерно 80 км². На широте в 30° аналогичный отсчет характеризует участок в 5000 км². Однако при этом измерения оказываются равноточными по любому направлению и не происходит геометрических искажений отдельных деталей рельефа поверхности планеты, связанных со значительным взаимным удалением отдельных подспутниковых следов в конце сеансов измерений.

Результат интерполяции радиовысотометрных измерений дан на рис. 4, где в стереографической проекции приведена карта высот се-

верной полярной области планеты Венера. Отсчет высот проводился от сферы с радиусом 6051 км. Линии равных уровней следуют по высоте через интервал 0,5 км, кроме того, через каждый километр по высоте изменяется тон соответствующей области. Наиболее темным сделан участок в районе полюса, где не производилась радиовысотомерная съемка. Узлы координатной сетки, к которым относятся значения высоты, следуют по горизонтали и по вертикали с интервалом примерно 4 км. Данный фрагмент карты содержит около $4 \cdot 10^6$ точек. На карте отмечены следующие крупные детали рельефа: Область Метиды — здесь начиналась и через 243 дня заканчивалась съемка, Горы Максвелла — наиболее высокое горное образование на Венере, Равнина Аталанты — самый низкий участок поверхности, где в обширной области высота рельефа находится ниже отметки — 1,0 км.

Данные о рельефе области, расположенной ниже 75° с. ш., в целом хорошо согласуются с результатами исследований американских ученых, полученных по данным альтиметрии аппарата «Пионер—Венера» [7], но за счет лучшей разрешающей способности вдоль трассы полета существенно дополняют их. Для участка выше 75° с. ш. информация о высоте поверхности получена впервые.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богомолов А. Ф., Жерихин Н. В., Соколов Г. А. // Радиофизика. 1985. Т. 28. № 2. С. 259 (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Маров М. Я. Планеты солнечной системы. — М.: Наука, 1986. — 84 с.
3. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. — М.: Сов. радио, 1978. — 380 с.
4. Howard H. T., Tyler G. L., Fjeldbo G. et. al. // Science. 1974. V. 183. № 4131. P. 1297.
5. Тузов Г. И. Статистическая теория приема сложных сигналов. — М.: Сов. радио, 1977. — 56 с.
6. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. — М.: Связь, 1976. — 447 с.
7. Pettengill G. H., Eliason E., Ford P. G. et al. // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. P. 8261.

Особое конструкторское бюро
Московского энергетического института

Поступила в редакцию
17 февраля 1987 г.

THE RESULTS OF RADIOALTIMETER DATA PROCESSING BY «VENERA-15», «VENERA-16» MISSIONS

A. V. Abramov, A. F. Bogomolov, A. V. Grechishchev,
N. V. Zherikhin, I. A. Zheltikov, V. F. Zajtsev,
G. M. Leuchenko, A. A. Morozov

Radioaltimeter data processing algorithms of the experiment by «Venera-15», «Venera-16» missions are discussed. Altimeter data have provided about 10 km spatial resolution along the spacecraft tracks. Root mean square (r.m.s.) error of the distance from spacecraft to planet's surface is estimated to within (30—70) meters. Method of a more precise trajectory definition according to altimeter data is suggested. As a result, r.m.s. error of hypsometric data is reduced to 100 meters approximately. Hypsometric map of Venus' northern region is shown.

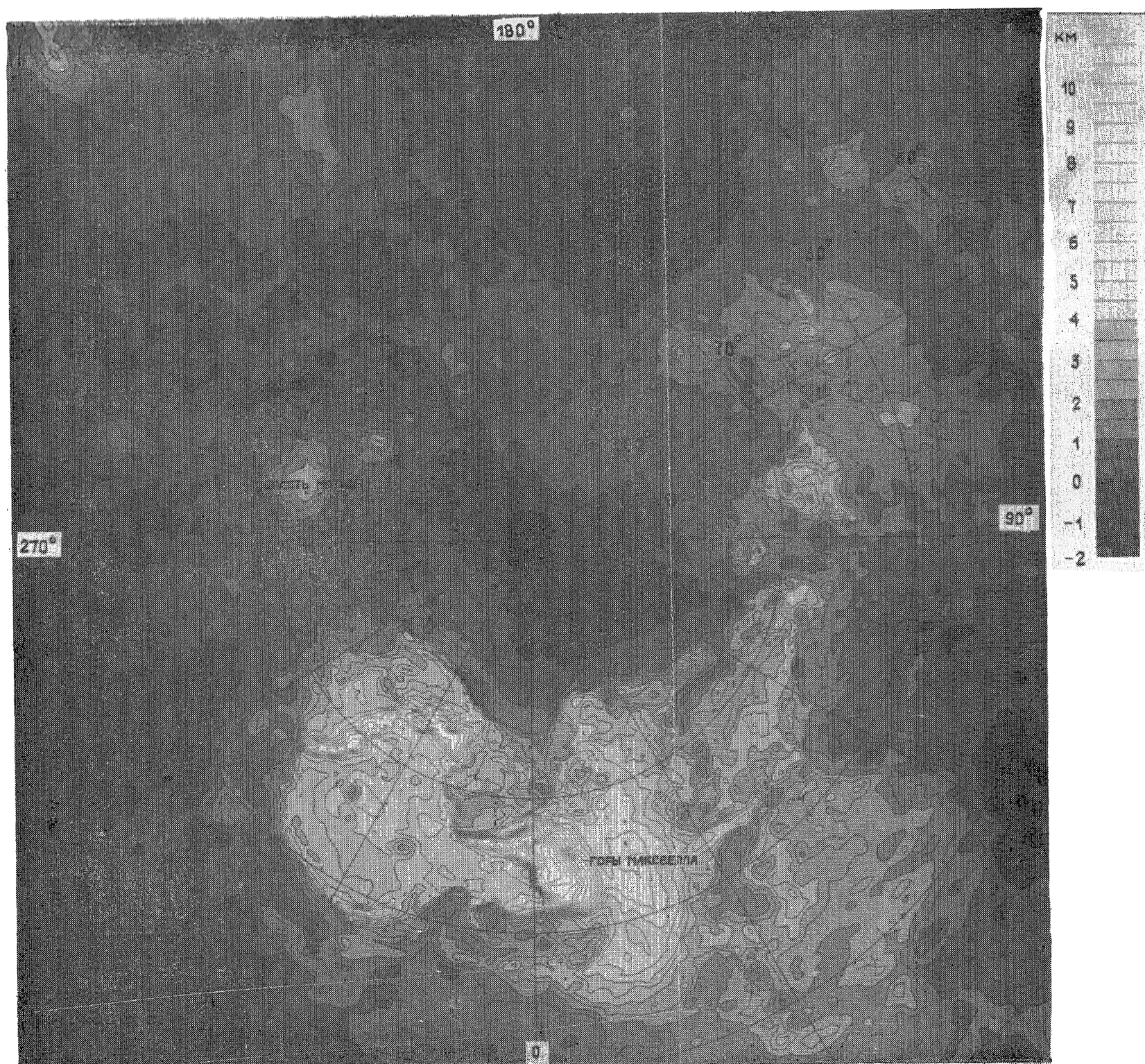


Рис. 4.