Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXIX, вып. 2, 1961 г.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ С ГРАВИТАЦИОННЫМ ГРАДИЕНТОМЕТРОМ

Д. Г. Успенский

В последнее время при гравиразведке начинают применяться короткорычажные быстродействующие градиентометры [8, 9]. Наблюдения с градиентометром производятся довольно быстро, а учет влияния рельефа местности трудоемок, продолжителен и часто недостаточно точен. При развитом рельефе погрешности при определении поправок за его влияние оказывают решающее действие на полную погрешность аномальных значений градиентов силы тяжести.

Аналитические способы учета влияния рельефа Н. Н. Самсонова, Б. В. Нумерова и др., применяемые при гравиразведке, требуют, чтобы уклон рельефа был не выше 1 : 10 (6°). Между тем месторождения часто имеют более резко выраженный рельеф с большими уклонами. В этих случаях гравиметристы обычно отказываются применять градиентометры и гравитационные вариометры. В настоящее время стремятся применять аналитический способ учета влияния рельефа Н. Н. Самсонова для случаев более сложного рельефа с уклонами до 12° и больше [5]. Эта рекомендация включена в инструкцию для работы с нивелирным комплектом ВИТР, прилагаемым к градиентометру ГРБ-М2. Такое направление работ по учету влияния рельефа нельзя считать допустимым.

Условно гравитационные аномалии можно разделить на три группы: 1) 10—50 этвешей, 2) 50—100 этвешей, 3) 100—200 этвешей. При исследовании первой, наиболее многочисленной, группы аномалий необходимо предъявлять особо высокие требования к точности наблюдений и определению поправок; для аномалий третьей группы требования могут быть пониженные, для второй группы — средние.

Сложность работ по учету рельефа на каждой точке измерений должна в основном зависеть от характера рельефа. На пунктах со слабо выраженным рельефом могут быть произведены менее трудоемкие работы по несколько упрощенной программе, на пунктах с резко выраженным рельефом — значительно более трудоемкие работы. Разделение пунктов на группы по степени сложности рельефа особенно необходимо при исследовании различных методов учета влияния рельефа. Этого не учитывает Л. М. Любимов [5].

Чрезвычайно важен выбор методики определения плотности грунта в условиях рельефа различной степени сложности и при различной требуемой точности конечных результатов. При больших значениях

поправки за влияние рельефа незначительная ошибка в определении плотности может дать большую погрешность конечного результата. Элементарные теоретические расчеты показывают, что в простейшем случае наклонной плоскости при уклоне 1 : 10 и плотности наносов 2 *г/см*^{3} ошибка на ±0,2 в определении плотности даст погрешность в определении поправки ±8,4 этвеша; при уклоне 1 : 20 ±4,2 этвеша и только при уклоне 1 : 40 погрешность достигает допустимого при точной съемке значения ±2,1 этвеша. Следовательно, при точной съемке при уклонах порядка 1 : 10 плотность грунта должна определяться не с точностью ±0,2, а с точностью приблизительно в четыре раза более высокой. При таких требованиях необходим тщательный и частый отбор проб грунта с разной глубины, определение их плотности при условиях естественной влажности, учет перемены влажности грунта под действием атмосферных осадков и пр.

При наличии крупных гравитационных аномалий требования к точности всех работ (в том числе и по определению плотности грунта) могут быть соответственно снижены. Вопросы разработки норм этого снижения должны быть экспериментально и теоретически изучены.

Таким образом, исследование существующих и разработка более рациональных способов учета влияния рельефа приобретают в настоящее время важное значение.

1. Некоторые способы учета влияния рельефа

Широко распространенными в СССР аналитическими способами учета влияния рельефа являются способы Б. В. Нумерова [1,6] и Н. Н. Самсонова [1, 5, 7].

Наиболее универсален способ Б. В. Нумерова. Вокруг пункта наблюдения разбивается четыре или более лучей. По каждому лучу определяются превышения на определенных расстояниях (радиусах) от пункта наблюдения. Таким образом, вокруг пункта наблюдения выделяется ряд блоков грунта и аналитически учитываются значения функции, характеризующей гравитационное действие каждого из блоков. Затем эти элементарные действия суммируются, учитывается действительная плотность грунта и вычисляется значение поправок для четырех вторых производных гравитационного потенциала. При выборе лучей вокруг пункта наблюдения и способа интерполяции рельефа между соседними радиусами Б. В. Нумеров пошел по пути, предложенному Р. Этвешем [3].

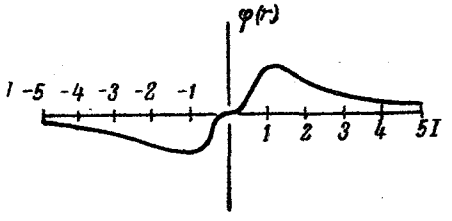


Рис. 1. Кривая $\varphi(r)$ при $\frac{H}{r} = 0{,}1$ [из 1]

Б. В. Нумеров проанализировал характер изменения влияния наклонной плоскости при изменении радиуса $\varphi(r)$ (рис. 1) и в соответствии с этим предложил набор радиусов нивелировки по каждому из лучей [1]. Однако ему пришлось учитывать различный характер изменения функций A и B соответственно для вычисления поправок для «кривизны» и «градиентов» и увеличивать число радиусов. При определении поправок только для градиентов можно сократить число радиусов при некотором их перераспределении.

При выводе формул Б. В. Нумеров использовал отличные от ранее применявшихся математические приемы, но сохранил основное ограни-

чение: уклон рельефа не выше 1 : 10 (около 6°). Это сказалось на выводе основных формул и окончательном вычислении таблиц значений функций A и B.

Основная формула для функции B [6, стр. 76]:

$$B = M'H_i + P'H_i^2 + N'H_{i+1} + Q'H_{i+1}^2 + R'(H_{i+1} - H_i)^2,$$

где M', N', P', Q', R' — коэффициенты, зависящие от выбранных радиусов;

H_i и H_{i+1} — превышения (рис. 2).

Для вычисления табличного значения функции B для первого радиуса необходимо использовать эту формулу два раза.

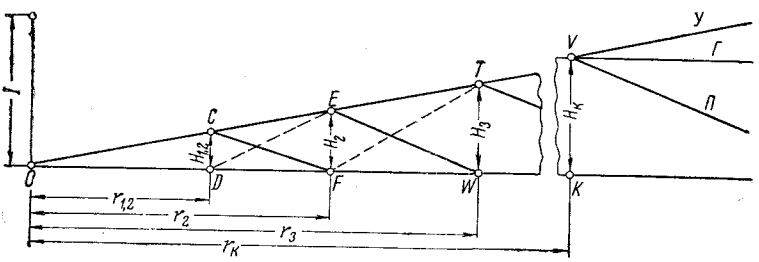


Рис. 2. Блоки для вычисления значений функции B при учете влияния рельефа. Три случая приближенного учета за пределами конечного радиуса $r_к$:

У — уклон по лучу сохраняется средний (значение функции $B_к^{у}$); *Г* — горизонтальный луч (значение функции $B_к^{г}$); *П* — перелом рельефа, уклон рельефа изменился на обратный (значение функции $B_к^{п}$)

1. Примем $H_i = 0$. Тогда

$$B_{i+1} = (B_{1,2})_1 = N_0'H_{1,2} + Q_0'H_{1,2}^2 + R_0'H_{1,2}^2.$$

В данном случае $(B_{1,2})_1$ характеризует влияние блока ODC (см. рис. 2).

2. Положим $H_i = H_{1,2}$ и $H_{i+1} = H_2 = 0$; тогда

$$B_i = (B_{1,2})_2 = M'_{1,2}H_{1,2} + P'_{1,2}H_{1,2}^2.$$

Квадратичным членом $R'_{1,2}H_{1,2}^2$ пренебрегают. Здесь $(B_{1,2})_2$ характеризует влияние блока CDF (см. рис. 2). Очевидно, в таблицы функции $B_{1,2}$ надо занести сумму этих двух влияний:

$$B_{1,2} = (B_{1,2})_1 + (B_{1,2})_2 = (M'_{1,2} + N_0')H_{1,2} +$$

$$+ (P'_{1,2} + Q_0' + R_0')H_{1,2}^2 = (62 + 119)H_{1,2} + (20 + 117 - 42)H_{1,2}^2 =$$

$$= 181H_{1,2} + 95H_{1,2}^2.$$

Эти коэффициенты 181; 95 указаны и Б. В. Нумеровым [6, стр. 80]. В этом случае значение функции $B_{1,2}$ будет характеризовать действие блока OCF.

Точно так же вычисляются значения функции B_2, характеризующие действие следующего блока DEW и т. д.

При составлении таблиц функции B_2 вычислительным путем учитывают действие блоков EDF, TFW и др. На практике же приходится

обычно иметь дело с рельефом, более или менее плавно повышающимся или понижающимся и не идущим горизонтально (рис. 2, *OD*) до предыдущего радиуса, а затем резко повышающимся (*DE*). Поэтому в данном случае следовало бы учитывать действие блока *FCEW*, а не блока *DEW*, и т. д.

По формулам Б. В. Нумерова в строгом виде разница влияний блоков должна учитываться квадратичным членом $R'(H_2—H_{1,2})^2$, но этот член при составлении таблиц функции *B* отбрасывается. Введение его увеличило бы число таблиц. При малых уклонах рельефа, не превышаю-

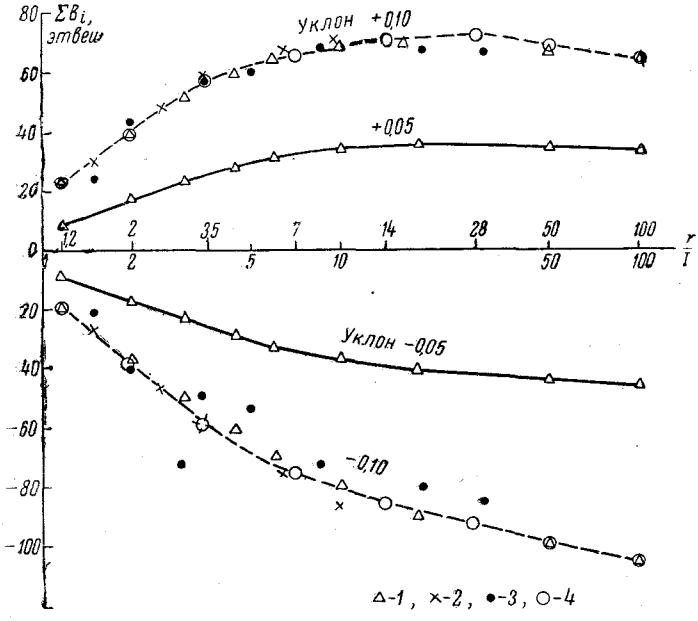


Рис. 3. Изменение суммы значений функции *B* с увеличением радиуса учета при наличии рельефа в виде наклонной плоскости:

1 — по таблицам Б. В. Нумерова; *2* — по рейке Н. Н. Самсонова; *3* — по таблицам С. В. Евсеева ($B_i=4F_i$); *4* — по таблицам или рейке Д. Г. Успенского

щих 1 : 10, игнорирование квадратичного члена не приносит заметной погрешности, но при уклонах до 1 : 5 погрешность для каждого из блоков (при радиусах свыше 3,5) достигает четырех этвешей для функции *B*.

На рис. 3, где дано изменение суммы значений функции *B* с увеличением радиуса учета влияния рельефа местности, по горизонтальной оси отложены отношения радиуса *r* к высоте центра тяжести крутильной системы градиентометра *I* в логарифмическом масштабе, по вертикальной — суммы значений функции *B*, выражающие влияние рельефа при учете его от пункта наблюдения до данного радиуса в нормальном масштабе при разных способах учета. Положительные значения функции *B* соответствуют повышению рельефа в виде наклонной плоскости с уклоном 0,1 или 0,05, а отрицательные — понижению рельефа с теми же уклонами. Плотность грунта 2 *г/см*^{3}. Как видно по кривым, нарастание суммарного эффекта на некоторых отрезках кривых подчиняется логарифмическому закону и может быть описано уравнением типа I.

$$\sum B_i + m_1 \lg \frac{r}{I} + n_1 = 0.$$

Для других отрезков этих кривых оказываются справедливыми уравнения типа II:

$$\sum B_i + m_2 \lg \lg \frac{r}{I} + n_2 = 0,$$

где m_1, m_2, n_1, n_2 — коэффициенты, определяемые по кривым рис. 3 и приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты m и n для уравнений типа I и II

Коэффициент	Отрицательная часть кривой			Положительная часть кривой		
	I	II	II	I	II	I
	1,2–4	4–14	14–100	1,2–4	4–14	14–100
Уклон 1:10						
m_1	+77	—	—	−70	—	+8,8
m_2	—	+88	+79	—	−45	—
n_1	+14	—	—	−18	—	−81
n_2	—	+79	+81	—	−69	—
Уклон 1:20						
m_1	+38	—	—	−36	—	+3,2
m_2	—	+42	+20	—	−31,5	
n_1	+6	—	—	−6	—	−39
n_2	—	+37	+39	—	−34	—

Примечание. Плотность грунта 2 *г/см*³; 1,2–4, 4–14, 14–100 I — интервалы радиусов (по способу Б. В. Нумерова).

Как видно из табл. 1, для отрицательной ветви кривой 1 : 10 уравнение типа I будет иметь следующее решение для радиуса 1,2I:

$$\sum B_i + 77 \lg 1{,}2 + 14 = 0,$$

откуда $\sum B_i = 20{,}1$ этвеша, а по таблице Б. В. Нумерова $\sum B_i = 20$ этвешей.

В качестве примера для уравнения типа II рассмотрим случай наклонной плоскости с уклоном 1 : 20 по отрицательной ветви кривой и определим суммарное значение функции B до радиуса 18I:

$$\sum B_i + 20 \lg \lg 18 + 39 = 0,$$

откуда $\sum B_i = -40{,}8E$, а по таблице Б. В. Нумерова $\sum B_i = 41E$.

Таким образом, приведенные формулы дают хорошие результаты и ими можно пользоваться для ориентировочных расчетов.

Б. В. Нумеров считал, что точный учет влияния рельефа следует вести в пределах радиуса 200, 100 или 50 *м*. За этими пределами он при-

нимал профиль рельефа по лучу в виде горизонтальной линии с высотной отметкой последнего радиуса. Для радиусов 100 и 50 *м* он дал два варианта таблиц со значениями, исправленными за это действие для конечных радиусов и неисправленными при наличии радиусов последующих.

Позже при употреблении способа Б. В. Нумерова стали ограничивать точный учет радиусом 18 *м*, иногда забывая исправить табличные значения функций *A* и *B* [2, стр. 26]. Если пункт наблюдения расположен у начала склоны горы, погрешность от применения данных таблиц *, по нашим подсчетам, при уклоне 1 : 10 по сравнению с точным значением достигает 14 этвешей для функции *B* и 160 этвешей для *A*. К сожалению, правильных таблиц для учета влияния рельефа по способу Б. В. Нумерова для конечного радиуса 18 *м* не опубликовано.

Для приближенного учета влияния рельефа за пределами конечного радиуса нивелировки мы применяем три варианта таблиц значений функции *B* для этого конечного радиуса: первый — уклон рельефа от пункта наблюдения до конечного радиуса сохраняется и за пределами последнего радиуса (см. рис. 2, случай *У*); второй — когда профиль рельефа по лучу за последним радиусом представляет собой горизонтальную линию с высотной отметкой последнего радиуса (см. рис. 2, случай *Г*); третий — на конечном радиусе имеет место перелом рельефа и вместо подъема начинается спуск или наоборот (см. рис. 2, случай *П*). Выбор нужного варианта производился по отметке нивелировщика о характере рельефа за пределами последнего радиуса. Этот способ дает значительное уточнение и его следует использовать.

Способ Н. Н. Самсонова возник в результате стремления упростить работы по учету влияния рельефа при наблюдениях с гравитационными вариометрами в условиях очень спокойного рельефа при определениях только двух вторых производных гравитационного потенциала — градиентов.

Подробного вывода формул опубликовано не было. В 1933 г. появились таблицы для построения специальной нивелировочной пятишкальной рейки для непосредственного определения значений функции *B* нивелировщиком в поле при уклонах рельефа, не превышающих 1 : 10 [7]. В 1941 г. были опубликованы таблицы значений функции *B* с краткими пояснениями для случаев рельефа, когда уклоны не превышают 1 : 10 [1]. В 1957 г. сообщалось, что рейка Н. Н. Самсонова включена в нивелирный комплект ** градиентометров ГРБ-1 и ГРБ-2 и применяется при уклонах, достигающих 12° [5, стр. 32, 34].

Как известно [1], при применении рейки Н. Н. Самсонова на склоне горы учитывается действие этого склона только до конечного радиуса $r_к = 9{,}5\ I$ (I — высота центра тяжести крутильной системы градиентометра над почвой). Для градиентометра ГРБ-2 $I = 0{,}6$ *м*, а $r_к = 5{,}7$ *м*.

Предположим, градиентометр установлен в точке перелома рельефа в начале склона горы с уклоном 10° и ориентирован так, что направление оси $+x$ идет вниз по склону. Можно определить точное значение поправки за влияние рельефа, используя известную формулу для действия наклонного уступа. Верхняя грань будет совпадать с почвой у основания прибора и глубина залегания верхней кромки

$$h = I = 0{,}6\ м.$$

---

* Таблицы приведены М. Е. Абельским [2, стр. 26].

** Отсчеты по этой рейке из комплекта несколько отличаются от ранее опубликованных данных [1].

Нижняя кромка будет находиться на расстоянии H по вертикали от центра тяжести системы. Предположим, этот склон протягивается до радиуса 120 *м*, а затем рельеф может быть принят за горизонтальную плоскость. Точное значение поправки за влияние рельефа для этого случая, определенное указанным выше способом, составит 106 этвешей (при плотности грунта 2 *г/см*^{3}). По способу Н. Н. Самсонова здесь будет учтено действие наклонной плоскости только на протяжении 5,7 *м*, а не 120 *м*. Расчет действия наклонного уступа для такого случая по рейке из комплекта градиентомера ГРБ-М2 дает поправку, составляющую только 85 этвешей и истинное значение поправки оказывается, таким образом, на 25% больше.

Следовательно, в условиях сложного рельефа нельзя использовать способ Н. Н. Самсонова. При более сложном рельефе необходимы наиболее точные способы, позволяющие учитывать действие масс, находящихся за пределами радиуса 5,7 *м* (при $I=0{,}6$ *м*).

2. Новые таблицы для учета влияния рельефа

Как следует из сказанного, назрела необходимость в разработке более рационального способа учета влияния рельефа, который мог бы обоснованно применяться на месторождениях с сильно развитым рельефом при уклонах свыше 1 : 10, был бы более точен и менее трудоемок. В связи с этим нами использованы положительные качества, присущие аналитическим и графическим методам. Последние не применяются в практике гравиразведки из-за громоздкости построений и большой трудоемкости.

Основным достоинством графического метода Г. Хаалька и аналогичного метода Н. Н. Самсонова является то, что они могут применяться при любых уклонах рельефа [1]. Палетка Г. Хаалька и Н. Н. Самсонова была нами приведена в более удобный вид введением дробных делений ($^1/_4$, $^1/_{16}$ этвеша), что позволило повысить точность подсчетов. Затем был выбран набор радиусов, графически построены блоки в соответствии с рис. 2 и после подсчета составлены таблицы значений функции B, подобные построенным аналитическим способом. Полевые и вычислительные работы при этом ведутся так же, как при любом аналитическом способе.

При выборе новых значений радиусов использовалась известная кривая $\varphi(r)$ рис. 1 [1]. На первом радиусе 1,2 I (0,72 *м* для градиентометра) ошибка в установке нивелирной рейки на 1 *см* (по высоте) дает погрешность порядка 4 этвешей для функции B. Желательно было бы уменьшить значение первого радиуса, чтобы сократить возможную погрешность. Однако радиус $1{,}2I$ изменять нецелесообразно, так как он находится как раз на максимуме кривой $\varphi(r)$ (см. рис. 1). Нами добавлен радиус $r = 0{,}6I$ и даны значения функции B для учета влияния рельефа местности на первых радиусах в двух вариантах (см. табл. 2). При необходимости можно определить превышения на радиусах 0,6 I и 1,2 I и воспользоваться шкалами табл. $2B_{0,6}$ и $B^{a}_{1,2}$. При наличии рельефа, который в пределах круга с радиусом 1,2 I имеет вид наклонной плоскости, можно определить превышения на радиусе $1{,}2I$ и воспользоваться шкалой $B^{в}_{1}$, (не используя шкал $B_{0,6}$ и $B^{a}_{1,2}$).

Во всех случаях необходимо особое внимание обращать на выбор места для пункта наблюдения с более или менее спокойным рельефом в непосредственной близости от пункта.

Таблица 2

Значение функции B для вычисления поправок за влияние рельефа местности

1				2		3			4				5				6			
$H_{0,6}$ и $H_{1,2}$	$B_{0,6}$	$B^{а}_{1,2}$	$B^{в}_{1,2}$	H_2	B_2	$H_{3,5}$ и H_7	$B_{3,5}$	B_7	H_{14}	$B^{п}_{14}$	$B^{г}_{14}$	$B^{у}_{14}$	H_{28}	$B^{п}_{28}$	$B^{г}_{28}$	$B^{у}_{28}$	H_{50}	$B^{п}_{50}$	$B^{г}_{50}$	$B^{у}_{50}$
—	—	—	—	—	—	—210	—	—58	—420	—47	—	—	—840	—40	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—205	—	—56	—410	—46	—	—	—820	—38	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—200	—	—55	—400	—44	—	—	—800	—37	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—195	—	—53	—390	—43	—	—	—780	—36	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—190	—	—51	—380	—41	—	—	—760	—34	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—185	—	—50	—370	—40	—	—	—740	—33	—	—	—	—	—	—
—36	—	—37	—55	—	—	—180	—	—48	—360	—38	—	—	—720	—32	—	—	—	—	—	—
—35	—	—36	—54	—	—	—175	—	—47	—350	—37	—	—	—700	—30	—	—	—	—	—	—
—34	—	—35	—52	—	—	—170	—	—46	—340	—36	—	—	—680	—29	—	—	—	—	—	—
—33	—	—35	—51	—	—	—165	—	—44	—330	—34	—	—	—660	—28	—	—	—	—	—	—
—32	—	—34	—50	—	—	—160	—	—43	—320	—33	—	—	—640	—26	—	—	—	—	—	—
—31	—	—33	—49	—	—	—155	—	—42	—310	—31	—	—	—620	—25	—	—	—	—	—	—
—30	—	—32	—47	—60	—48	—150	—	—40	—300	—30	—	—	—600	—24	—	—	—1500	—36	—45	—60
—29	—	—31	—46	—58	—47	—145	—	—39	—290	—28	—	—	—580	—22	—	—	—1450	—34	—43	—58
—28	—	—30	—45	—56	—46	—140	—	—37	—280	—27	—39	—87	—560	—21	—31	—60	—1400	—32	—41	—56
—27	—	—29	—44	—54	—44	—135	—	—35	—270	—26	—37	—84	—540	—20	—30	—58	—1350	—30	—39	—54
—26	—	—28	—42	—52	—43	—130	—	—33	—260	—24	—36	—78	—520	—19	—28	—54	—1300	—29	—36	—52
—25	—	—28	—41	—50	—42	—125	—	—32	—250	—23	—34	—74	—500	—18	—27	—51	—1250	—27	—34	—50
—24	—	—27	—40	—48	—41	—120	—	—30	—240	—22	—32	—70	—480	—17	—25	—48	—1200	—25	—32	—47
—23	—	—26	—38	—46	—40	—115	—	—28	—230	—20	—30	—65	—460	—16	—24	—45	—1150	—24	—30	—45
—22	—	—25	—37	—44	—39	—110	—	—27	—220	—19	—29	—61	—440	—15	—23	—42	—1100	—22	—28	—43
—21	—	—24	—35	—42	—38	—105	—62	—25	—210	—18	—27	—57	—420	—14	—22	—39	—1050	—20	—26	—41
—20	—	—23	—33	—40	—37	—100	—59	—23	—200	—17	—26	—53	—400	—13	—21	—36	—1000	—18	—24	—39
—19	—	—22	—32	—38	—35	— 95	—56	—22	—190	—16	—24	—49	—380	—12	—19	—34	— 950	—17	—23	—36
—18	—18	—20	—30	—36	—33	— 90	—52	—20	—180	—15	—22	—45	—360	—11	—18	—31	— 900	—16	—21	—34
—17	—17	—19	—29	—34	—31	— 85	—49	—19	—170	—14	—21	—42	—340	—10	—17	—28	— 850	—14	—19	—30
—16	—16	—18	—27	—32	—29	— 80	—46	—18	—160	—12	—19	—38	—320	— 9	—15	—25	— 800	—13	—17	—28
—15	—15	—17	—25	—30	—27	— 75	—43	—16	—150	—11	—18	—34	—300	— 8	—14	—23	— 750	—12	—16	—25
—14	—15	—16	—24	—28	—26	— 70	—40	—15	—140	—10	—16	—30	—280	— 7	—12	—20	— 700	—11	—15	—23
—13	—14	—15	—22	—26	—24	— 65	—37	—13	—130	— 9	—15	—27	—260	— 7	—11	—18	— 650	—10	—14	—20
—12	—13	—14	—20	—24	—22	— 60	—34	—12	—120	— 9	—14	—25	—240	— 6	—10	—16	— 600	— 9	—12	—18
—11	—12	—13	—19	—22	—20	— 55	—32	—11	—110	— 8	—13	—22	—220	— 6	— 9	—15	— 550	— 8	—10	—16
—10	—11	—12	—17	—20	—18	— 50	—29	—10	—100	— 7	—11	—20	—200	— 5	— 8	—13	— 500	— 7	— 9	—13

Продолжение табл. 2

1				2		3			4				5				6			
$H_{0,6}$ и $H_{1,2}$	$B_{0,6}$	$B^{а}_{1,2}$	$B^{в}_{1,2}$	H_2	B_2	$H_{3,5}$ и H_7	$B_{3,5}$	B_7	H_{14}	$B^{п}_{14}$	$B^{г}_{14}$	$B^{у}_{14}$	H_{28}	$B^{п}_{28}$	$B^{г}_{28}$	$B^{у}_{28}$	H_{50}	$B^{п}_{50}$	$B^{г}_{50}$	$B^{у}_{50}$
— 9	—10	—10	—15	—18	—16	— 45	—26	— 9	— 90	—6	—10	—17	—180	—4	—7	—12	— 450	— 6	— 8	—11
— 8	— 8	— 9	—14	—16	—14	— 40	—24	— 8	— 80	—6	— 9	—15	—160	—4	—6	—10	— 400	— 6	— 7	—10
— 7	— 7	— 8	—12	—14	—12	— 35	—21	— 7	— 70	—5	— 8	—12	—140	—3	—5	— 9	— 350	— 5	— 6	— 9
— 6	— 6	— 7	—10	—12	—11	— 30	—18	— 6	— 60	—4	— 7	—10	—120	—3	—4	— 8	— 300	— 4	— 5	— 7
— 5	— 5	— 6	— 9	—10	— 9	— 25	—15	— 5	— 50	—4	— 6	— 9	—100	—2	—4	— 7	— 250	— 4	— 5	— 6
— 4	— 4	— 5	— 7	— 8	— 7	— 20	—12	— 4	— 40	—3	— 5	— 7	— 80	—2	—3	— 5	— 200	— 3	— 4	— 5
— 3	— 3	— 3	— 5	— 6	— 5	— 15	— 9	— 3	— 30	—2	— 3	— 5	— 60	—1	—2	— 4	— 150	— 2	— 3	— 3
— 2	— 2	— 2	— 3	— 4	— 3	— 10	— 6	— 2	— 20	—1	— 2	— 4	— 40	—1	—1	— 3	— 100	— 1	— 1	— 1
— 1	— 1	— 1	— 2	— 2	— 2	— 5	— 3	— 1	— 10	—1	— 1	— 2	— 20	—1	—1	— 1	— 50	— 1	— 1	— 1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+ 1	+ 1	+ 1	+ 2	+ 2	+ 2	+ 5	+ 2	+ 1	+ 10	0	+ 1	0	+ 20	+1	0	0	+ 50	0	0	0
+ 2	+ 2	+ 3	+ 4	+ 4	+ 3	+ 10	+ 5	+ 1	+ 20	+1	+ 1	+ 1	+ 40	+1	+1	0	+ 100	+ 1	+ 1	+ 1
+ 3	+ 3	+ 4	+ 6	+ 6	+ 5	+ 15	+ 7	+ 2	+ 30	+1	+ 2	+ 1	+ 60	+1	+1	+ 1	+ 150	0	0	0
+ 4	+ 5	+ 5	+ 8	+ 8	+ 7	+ 20	+ 9	+ 2	+ 40	+2	+ 2	+ 1	+ 80	+2	+2	+ 1	+ 200	0	0	0
+ 5	+ 6	+ 7	+10	+10	+ 9	+ 25	+11	+ 3	+ 50	+2	+ 3	+ 1	+100	+2	+2	+ 1	+ 250	— 1	— 1	— 2
+ 6	+ 7	+ 8	+11	+12	+11	+ 30	+14	+ 3	+ 60	+3	+ 3	+ 2	+120	+3	+2	+ 2	+ 300	— 2	— 2	— 3
+ 7	+ 8	+ 9	+13	+14	+12	+ 35	+15	+ 4	+ 70	+3	+ 4	+ 2	+140	+3	+3	+ 2	+ 350	— 2	— 2	— 4
+ 8	+10	+11	+15	+16	+14	+ 40	+17	+ 5	+ 80	+4	+ 5	+ 2	+160	+3	+3	+ 1	+ 400	— 3	— 3	— 5
+ 9	+11	+12	+18	+18	+16	+ 45	+19	+ 5	+ 90	+4	+ 5	+ 2	+180	+3	+2	0	+ 450	— 4	— 4	— 7
+10	+12	+13	+19	+20	+18	+ 50	+20	+ 6	+100	+4	+ 6	+ 2	+200	+2	+2	— 1	+ 500	— 4	— 5	— 8
+11	+14	+15	+21	+22	+20	+ 55	+22	+ 6	+110	+4	+ 6	+ 1	+220	+2	+2	— 3	+ 550	— 5	— 6	—10
+12	+15	+16	+23	+24	+22	+ 60	+24	+ 7	+120	+5	+ 7	0	+240	+2	+1	— 4	+ 600	— 6	— 7	—12
+13	+16	+17	+25	+26	+24	+ 65	+25	+ 7	+130	+5	+ 7	0	+260	+2	+1	— 5	+ 650	— 6	— 8	—13
+14	+18	+19	+27	+28	+26	+ 70	+26	+ 8	+140	+5	+ 8	— 1	+280	+2	0	— 6	+ 700	— 7	— 9	—15
+15	+20	+20	+29	+30	+28	+ 75	+27	+ 8	+150	+4	+ 7	— 3	+300	+1	—1	— 7	+ 750	— 7	— 9	—15
+16	+21	+22	+32	+32	+30	+ 80	+27	+ 9	+160	+4	+ 6	— 5	+320	+1	—1	— 8	+ 800	— 8	—10	—18
+17	+23	+23	+34	+34	+32	+ 85	+28	+ 9	+170	+3	+ 6	— 7	+340	0	—2	—11	+ 850	— 9	—12	—21
+18	+25	+25	+36	+36	+34	+ 90	+29	+10	+180	+3	+ 5	—10	+360	0	—3	—12	+ 900	—10	—13	—24
+19	—	+26	+38	+38	+36	+ 95	+29	+10	+190	+2	+ 4	—12	+380	—1	—4	—14	+ 950	—11	—15	—26
+20	—	+28	+40	+40	+38	+100	+30	+10	+200	+2	+ 4	—14	+400	—2	—4	—15	+1000	—12	—16	—29
+21	—	+29	+42	+42	+39	+105	+31	+11	+210	+1	+ 3	—16	+420	—2	— 5	—17	+1050	—15	—19	—32

1				2		3			4				5				6			
$H_{0,6}$ и $H_{1,2}$	$B_{0,6}$	$B^{а}_{1,2}$	$B^{в}_{1,2}$	H_2	B_2	$H_{3,5}$ и H_7	$B_{3,5}$	B_7	H_{14}	$B^{п}_{14}$	$B^{г}_{14}$	$B^{у}_{14}$	H_{28}	$B^{п}_{28}$	$B^{г}_{28}$	$B^{у}_{28}$	H_{50}	$B^{п}_{50}$	$B^{г}_{50}$	$B^{у}_{50}$
+22	—	+31	+44	+44	+41	+110	—	+11	+220	0	+2	−20	+440	— 3	— 7	−20	+1100	−17	−22	−35
+23	—	+32	+47	+46	+42	+115	—	+11	+230	0	+1	−23	+460	— 4	— 8	−23	+1150	−19	−24	−38
+24	—	+34	+49	+48	+43	+120	—	+11	+240	— 1	0	−27	+480	— 5	−10	−26	+1200	−22	−28	−42
+25	—	+36	+52	+50	+44	+125	—	+11	+250	— 2	0	−32	+500	— 6	−11	−30	+1250	−24	−30	−45
+26	—	+39	+55	+52	+45	+130	—	+12	+260	— 3	−1	−36	+520	— 8	−13	−33	+1300	−26	−33	−48
+27	—	+41	+58	+54	+46	+135	—	+11	+270	— 3	−2	−39	+540	— 9	−15	−36	+1350	−29	−36	−51
+28	—	+43	+61	+56	+48	+140	—	+12	+280	— 4	−3	−43	+560	−10	−16	−39	+1400	−31	−39	−54
+29	—	+45	+64	+58	+50	+145	—	+11	+290	— 5	—	—	+580	−11	—	—	+1450	−34	−42	−57
+30	—	+47	+67	+60	+51	+150	—	+10	+300	— 6	—	—	+600	−12	—	—	+1500	−36	−45	−60
+31	—	+49	+69	—	—	+155	—	+ 9	+310	— 7	—	—	+620	−13	—	—	—	—	—	—
+32	—	+51	+72	—	—	+160	—	+ 9	+320	— 8	—	—	+640	−14	—	—	—	—	—	—
+33	—	+53	+75	—	—	+165	—	+ 8	+330	— 8	—	—	+660	−16	—	—	—	—	—	—
+34	—	+55	+78	—	—	+170	—	+ 8	+340	— 9	—	—	+680	−17	—	—	—	—	—	—
+35	—	+56	+81	—	—	+175	—	+ 7	+350	−10	—	—	+700	−18	—	—	—	—	—	—
+36	—	+57	+82	—	—	+180	—	+ 7	+360	−11	—	—	+720	−19	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	+185	—	+ 6	+370	−12	—	—	+740	−20	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	+190	—	+ 6	+380	−13	—	—	+760	−21	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	+195	—	+ 5	+390	−14	—	—	+780	−23	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	+200	—	+ 5	+400	−15	—	—	+800	−24	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	+205	—	+ 4	+410	−16	—	—	+820	−25	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	+210	—	+ 3	+420	−17	—	—	+840	−26	—	—	—	—	—	—

Примечание. Плотность грунта при вычислении принята 2,0 *г/см*³; значение функции *B* дано в этвешах; значение превышений *H* — в сотых долях *l* (высота центра тяжести крутильной системы); значение радиусов 0,6, 1,2 и т. д. — в целых единицах *l*.

Для прибора с высотой центра тяжести крутильной системы $l = 1$ *м* превышения будут выражены в сантиметрах, а радиусы — в метрах. Для прибора с высотой центра тяжести крутильной системы $l = 0{,}6$ *м* все значения превышений и радиусов в таблице следует умножить на 0,6 (получить превышения в сантиметрах и радиусы в метрах).

Второй радиус $2l$ не должен изменяться, так как он находится в очень важном месте кривой $\varphi(r)$ (см. рис. 1). По тем же причинам более целесообразно выбрать третий радиус равным $3{,}5l$. Тогда следующие радиусы по логарифмическому закону будут $7l$, $14l$, $28l$, $50l$ (округленно). Следует считать удачным, что радиусы $3{,}5l$ и $14l$ лежат в зонах, где изменяется закон нарастания значений функции B (см. рис. 3).

При более или менее спокойном рельефе можно производить точный учет до радиуса $14l$, учитывая приближенно влияние рельефа за пределами этого радиуса экстраполяцией для трех случаев лучей: горизонтального, наклонного, наклонного в обратном направлении (см. рис. 2, *Г*, *У*, *П*).

При более сложном рельефе точный учет рельефа необходимо вести до радиусов 28 или 50 l также с экстраполяцией для трех случаев хода лучей. При учете до радиуса 14 l могут быть использованы 5 или 6 радиусов, как и в способе Н. Н. Самсонова. Однако по предлагаемому способу первый радиус 0,6 l в два с половиной раза меньше, а последний 14 l в полтора раза больше, чем по способу Н. Н. Самсонова. При использовании трех шкал (табл. 2, $B^{у}_{14}$, $B^{г}_{14}$, $B^{п}_{14}$) для последнего радиуса $14l$ для трех случаев экстраполяции точность определения поправки за рельеф еще более повысится по сравнению со способом Н. Н. Самсонова.

Всего предлагается шесть таблиц, так как интервалы изменения превышений H должны быть различны для разных радиусов: например, для радиусов $0{,}6—1{,}2l$ интервал выбран $0{,}01l$, для радиуса $2l$ — $0{,}02l$, а для последнего радиуса $50l$ — $0{,}50l$. При таком выборе интервалов обеспечивается необходимая точность определения значений функции B. При составлении таблиц максимальный уклон рельефа принят за 1 : 3 (около 20°), а не 1 : 10, как в таблицах Б. В. Нумерова. С помощью использованного нами метода вычисления значений функции B максимальный уклон может быть повышен еще больше. Таблицы могут быть легко довычислены.

Некоторые графы таблиц снабжены дополнительными значками, например, $B^{а}_{1,2}$ и $B^{в}_{1,2}$ или $B^{у}_{14}$, $B^{г}_{14}$, $B^{п}_{14}$. В связи с этим необходимо дать пояснения, приведенные ниже.

I. Данные шкал $B_{0,6}$ и $B_{1,2}$ надо использовать следующим образом:

1) шкалу $B_{0,6}$ — только при необходимости точного учета влияния неровностей вблизи от прибора, вслед за тем следует взять шкалы $B^{а}_{1,2}$, B_2 и т. д. (шкала $B^{в}_{1,2}$ в этом случае не используется);

2) шкалу $B^{в}_{1,2}$ — в случае, когда рельеф в пределах радиуса $1{,}2l$ можно принять за наклонную плоскость (шкалы $B_{0,6}$ и $B^{а}_{1,2}$ не используются).

II. Шкалы от $B^{у}_{14}$ до $B^{п}_{50}$ следует применять следующим образом:

1) точный учет рельефа можно производить до радиусов 14, 28 или 50 l; если учет на данном радиусе не заканчивают, то следует затем взять соответствующую шкалу $B^{п}$;

2) если учет заканчивают на данном радиусе, то могут иметь место три случая: а) наклон рельефа местности по лучу за последним радиусом принимает направление, обратное тому, которое наблюдалось на протяжении данного радиуса (высотная отметка последнего радиуса относится к точке перелома рельефа, к перевалу или тальвегу), — следует применять для последнего радиуса шкалу $B^{п}$ в соответствии с рис. 2,

случай *П*, б) за последним радиусом по лучу профиль рельефа идет по горизонтали с высотной отметкой последнего радиуса (рис. 2, случай *Г*) — следует применять для последнего радиуса шкалу $B^{г}$; в) за последним радиусом рельеф по лучу продолжает идти с таким же уклоном, как на протяжении данного радиуса (рис. 2, случай *У*), — следует применять для последнего радиуса шкалу $B^{у}$. Если этот уклон окажется меньше, чем до конечного радиуса, то значения функции B можно определить по таблицам $B^{у}$ и $B^{г}$ путем интерполяции.

При составлении таблиц принималось, что по лучу идет равномерное поднятие или понижение рельефа. Если же рельеф выражен горизонтальной плоскостью до предыдущего радиуса, а затем в виде сильно наклонной плоскости поднимается или опускается до высотной отметки последнего радиуса (см. рис. 2, треугольник *DEW*), необходимо учесть действие блока в виде треугольника *DEW*, а не четырехугольника *CEWF*, как учитывалось при составлении таблиц. Наши подсчеты по палетке показали, что за счет разного действия этих блоков следует вводить поправку только при наличии больших значений отношения высотной отметки $H : r$. Если это значение будет меньше 1 : 10, то вводить поправки не следует. Если это значение будет 1 : 5 (например, превышение 0,7 *I* для радиуса 3,5 *I*), то следует прибавить поправку $+4E$ к значению функции $\pm B$, найденному по таблице (например, $-18+4=-14$ и $+11+4=+15$) для радиусов $r=3{,}5\ I$ и выше. Поправки для радиусов $r=1{,}2\ I$ и $r=2\ I$ незначительны и их можно не вводить.

При промежуточных случаях рельефа следует добавлять пропорционально уменьшенную поправку, учитывая, что при отношении 1 : 10 она близка к нулю. Очевидно, эта поправка по существу должна соответствовать результатам, полученным при применении квадратичного члена в формуле Б. В. Нумерова $+n(H_{i+1}-H_i)^2$. Однако, по нашим данным, она более значительна и изменяется по другому закону. На рис. 3 показано изменение суммы значений функции B с увеличением радиуса при наличии рельефа в виде наклонной плоскости. Кривые, полученные по нашему способу, очень близки к кривым для способа Б. В. Нумерова.

Примером применения таблиц для учета влияния рельефа (из полевой практики для $I=1$ *м*) является табл. 3.

Таблица 3

Пример применения табл. 2

Радиус, *м*	Луч, *град*							
	0	45	90	135	180	225	270	315
	Превышения, *см* (результат нивелировки)							
1,2	−11	−14	− 9	0	+ 10	+ 14	+ 10	−5
2	−23	−27	−24	0	+ 12	+ 26	+ 17	−5
3,5	−37	−47	−33	0	+ 27	+ 44	+ 29	−6
7	− 58	−82	−53	+18	+ 58	+ 83	+ 59	−6
14	− 60	−50	−81	+15	+111	+150	+131	−2
За радиусом 14 *м* считать по табл. 2*	$B^{у}_{14}$	$B^{у}_{14}$	$B^{г}_{14}$	$B^{г}_{14}$	$B^{г}_{14}$	$B^{г}_{14}$	$B^{г}_{14}$	$B^{г}_{14}$

Продолжение табл. 3

Радиус, *м*	Луч, *град*							
	0	45	90	135	180	225	270	315
	Значения функции B (по табл. 2), **этвеши**							
1,2	—19	—24	—15	0	+19	+27	+19	— 9
2	—21	—25	—22	0	+11	+24	+15	— 4
3,5	—22	—28	—20	0	+13	+19	+14	— 3
7	—12	—18	—10	+2	+ 6	+ 9	+ 7	— 1
14	—10	— 9	— 9	+1	+ 6	+ 7	+ 7	0
$\sum B$	—84	—104	—76	+3	+55	+86	+62	—17

* Эта отметка о характере рельефа за пределами последнего радиуса делается нивелировщиком в полевой книжке.

Вычисление поправок для восьми лучей

$$U_{xz} = \frac{\sigma}{\sigma_1}\,[0{,}25\,(\sum B_{0^\circ} - \sum B_{180^\circ}) + 0{,}177\,(\sum B_{45^\circ} -$$

$$- \sum B_{135^\circ} - \sum B_{225^\circ} + \sum B_{315^\circ})] = -0{,}25 \cdot 135 - 0{,}177 \cdot 210 = -72 \text{ этвеша};$$

$$U_{yz} = \frac{\sigma}{\sigma_0}\,[0{,}25\,(\sum B_{90^\circ} - \sum B_{270^\circ}) + 0{,}177\,(\sum B_{45^\circ} +$$

$$+ \sum B_{135^\circ} - \sum B_{225^\circ} - \sum B_{315^\circ})] = -0{,}25 \cdot 138 -$$

$$-0{,}177 \cdot 170 = -65 \text{ этвешей},$$

где σ и σ_0 — плотность грунта истинная и принятая в таблице.

Вычисление поправок для четырех лучей: 0, 90, 180, 270°

$$U_{xz} = \frac{\sigma}{\sigma_0}\,0{,}50\,(\sum B_{0^\circ} - \sum B_{180^\circ}) = 0{,}5 \cdot 139 = -69{,}5 \text{ этвешей};$$

$$U_{yz} = \frac{\sigma}{\sigma_0}\,0{,}50\,(\sum B_{90^\circ} - \sum B_{270^\circ}) = -0{,}5 \cdot 138 = -69 \text{ этвешей};$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1.$$

Работы по учету влияния рельефа можно ускорить, применив подвижные шкалы; при этих работах пользуются нормальной нивелирной

рейкой, а для исключения трудоемкой операции по вычислению превышений применяют предложенные нами подвижные шкалы для таблиц функции B. На подвижные шкалы наносятся последовательные отсчеты по рейке через те интервалы, для которых построена таблица функции B для данного радиуса. В табл. 2 при $I=1$ *м* для радиуса $r=1{,}2$ *м* $H_{1,2}$ изменяется от нуля вверх и вниз через 1 *см*. Соответственно и на подвижной шкале должны быть отложены отсчеты по рейке через 1 *см*; например, от исходного отсчета 120 *см* вверх 121, 122, 123 и вниз 119, 118, 117 и т. д. Тогда, если высота нивелира над данным пунктом наблюдения окажется 122 *см*, достаточно приложить отсчет 122 подвижной шкалы к нулю неподвижной шкалы $H_{1,2}$ и против любого отсчета по подвижной шкале мы найдем в табл. 2 значение функции $B^{в}_{1,2}$: против $H=123$ — соответственно $-2E$, против $H=120$ — соответственно $+4E$ и т. д. Для радиуса 2 *м* надо использовать подвижную шкалу, построенную через 2 *см* в соответствии с устройством шкалы таблицы H_2 и т. д. Полученные значения функции B затем обрабатываются обычным способом. Вычислительная работа при использовании подвижных шкал, в отличие от неподвижных, сокращается примерно в два раза за счет исключения трудоемкой операции вычисления превышений по данным нивелировки.

Таблицы значений функции B предназначены для работы с обычной нивелирной рейкой, но они могут быть использованы для построения шкал специальной нивелирной рейки, подобной рейке Н. Н. Самсонова [1]. На переднюю сторону такой рейки можно нанести шкалы для радиусов 1,2; 2; $3I$, а на обратную — 7; $14^{у}$; $14^{г}I$. Башмак такой рейки должен быть сделан подвижным: нуль рейки должен подниматься или опускаться до горизонта нивелира [1].

В табл. 4 даны шкалы такой специальной нивелирной рейки для работы по учету влияния рельефа при наблюдениях с градиентометром ГРБ-М2, у которого высота центра тяжести крутильной системы — 0,6 *м*. Все значения радиуса учета влияния рельефа по нашему способу 1,2; 2; $3I$... умножены на 0,6 *м* и получены значения 0,72; 1,2 *м* и т. д. Так как шкалы — безынтерполяционные, приведены дробные значения функции B: 0,5; 1,5 этвеша и т. д. От отсчета 0,5 до 1,5 протягивается деление 1 этвеш. Из имеющихся на рейке шести шкал 0,72; 1,2; 2,1; 4,2; 8,4 (у, г) при работе по каждому из лучей используют только пять; из двух последних $B^{у}_{8,4}$ и $B^{г}_{8,4}$ используют только одну, в зависимости от характера рельефа по лучу от радиуса 8,4 *м* до радиуса примерно 100 *м*. Если на этом интервале средний уклон рельефа по лучу, зарегистрированный от пункта наблюдения до радиуса 8,4 *м*, продолжается, то используют шкалу $B^{у}_{8,4}$ (шкалу $B^{г}_{8,4}$ не применяют). Если на этом интервале рельеф по лучу горизонтален с высотной отметкой последнего радиуса 8,4 *м*, то расчеты ведут по шкале $B^{г}_{8,4}$ (шкалу $B^{у}_{8,4}$ не используют). При промежуточных случаях рельефа на этом интервале следует произвести интерполяцию между отсчетами по обеим этим шкалам. Сопоставление шкал $B^{у}_{8,4}$ и $B^{г}_{8,4}$ показывает, что при резко выраженном рельефе разница для значений функции B при применении той или другой шкалы достигает больших значений и при подобной интерполяции может быть получена большая погрешность. В этих случаях следует учитывать влияние рельефа до радиусов 28 и $50I$, употребляя обычную нивелирную рейку и табл. 2.

При применении рейки с подвижным башмаком и нашими шкалами дальнейшие вычисления ведутся так же, как и по табл. 2 (см. выше пример применения).

Таблица 4

Шкалы рейки для учета влияния рельефа при наблюдениях с градиентометром ГРБ (шкалы безынтерполяционные)

B для радиусов 0,72—2,1	1			2		3		4	
	$H_{0,72}$	$H_{1,2}$	$H_{2,1}$	$B_{4,2}$	$H_{4,2}$	$B^{у}_{8,4}$	$H^{у}_{8,4}$	$B^{г}_{8,4}$	$H^{г}_{8,4}$
—	—	—	—	—	—	—43,5	—1700	—	—
—	—	—	—	—	—	—42,5	—1650	—	—
—	—	—	—	—	—	—41,5	—1625	—	—
—	—	—	—	—	—	—40,5	—1600	—	—
—	—	—	—	—	—	—39,5	—1575	—	—
—	—	—	—	—	—	—38,5	—1550	—	—
—	—	—	—	—	—	—37,5	—1525	—	—
—	—	—	—	—	—	—36,5	—1500	—	—
—	—	—	—	—	—	—35,5	—1470	—	—
—	—	—	—	—	—	—34,5	—1440	—	—
—	—	—	—	—	—	—33,5	—1410	—	—
—	—	—	—	—	—	—32,5	—1380	—	—
—	—	—	—	—	—	—31,5	—1350	—	—
—30,5	—	—	—622	—	—	—30,5	—1320	—	—
—29,5	—	—	—604	—	—	—29,5	—1290	—	—
—28,5	—	—	—584	—28,5	—1245	—28,5	—1260	—	—
—27,5	—216	—	—563	—27,5	—1200	—27,5	—1230	—	—
—26,5	—207	—	—546	—26,5	—1160	—26,5	—1200	—	—
—25,5	—198	—	—526	—25,5	—1120	—25,5	—1170	—	—
—24,5	—189	—372	—506	—24,5	—1080	—24,5	—1140	—	—
—23,5	—180	—353	—488	—23,5	—1040	—23,5	—1110	—	—
—22,5	—171	—331	—470	—22,5	—1000	—22,5	—1080	—	—
—21,5	—161	—309	—450	—21,5	— 960	—21,5	—1050	—	—
—20,5	—151	—286	—432	—20,5	— 920	—20,5	—1020	—	—
—19,5	—143	—265	—408	—19,5	— 880	—19,5	— 985	—19,5	—1685
—18,5	—135	—241	—384	—18,5	— 840	—18,5	— 950	—18,5	—1615
—17,5	—127	—228	—360	—17,5	— 805	—17,5	— 915	—17,5	—1545
—16,5	—119	—215	—336	—16,5	— 770	—16,5	— 880	—16,5	—1470
—15,5	—111	—202	—312	—15,5	— 735	—15,5	— 845	—15,5	—1395
—14,5	—103	—189	—292	—14,5	— 700	—14,5	— 810	—14,5	—1320
—13,5	— 95	—176	—272	—13,5	— 665	—13,5	— 770	—13,5	—1245
—12,5	— 87	—163	—252	—12,5	— 630	—12,5	— 725	—12,5	—1170
—11,5	— 80	—150	—232	—11,5	— 590	—11,5	— 680	—11,5	—1095
—10,5	— 73	—137	—212	—10,5	— 550	—10,5	— 630	—10,5	—1020
— 9,5	— 66	—124	—192	— 9,5	— 510	— 9,5	— 580	— 9,5	— 945
— 8,5	— 59	—111	—172	— 8,5	— 470	— 8,5	— 530	— 8,5	— 865
— 7,5	— 52	— 98	—152	— 7,5	— 430	— 7,5	— 480	— 7,5	— 765
— 6,5	— 45	— 85	—132	— 6,5	— 380	— 6,5	— 430	— 6,5	— 665
— 5,5	— 38	— 72	—112	— 5,5	— 330	— 5,5	— 380	— 5,5	— 565
— 4,5	— 31	— 59	— 92	— 4,5	— 270	— 4,5	— 320	— 4,5	— 465
— 3,5	— 24	— 46	— 72	— 3,5	— 210	— 3,5	— 260	— 3,5	— 365
— 2,5	— 17	— 33	— 52	— 2,5	— 150	— 2,5	— 190	— 2,5	— 265
— 1,5	— 10	— 20	— 32	— 1,5	— 90	— 1,5	— 120	— 1,5	— 165
— 0,5	— 3	— 6	— 12	— 0,5	— 30	— 0,5	— 40	— 0,5	— 55
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	3	6	12	0,5	50	0,5	210	0,5	120
1,5	10	20	36	1,5	150	0,5	660	1,5	330
2,5	17	33	60	2,5	260	— 0,5	820	2,5	540
3,5	24	49	90	3,5	380	— 1,5	900	3,5	750
4,5	30	62	120	4,5	530	— 2,5	960	3,5	900
5,5	36	75	150	5,5	720	— 3,5	1010	2,5	1070
6,5	42	88	180	6,5	800	— 4,5	1060	1,5	1230
7,5	48	101	210	5,5	880	— 5,5	1110	0,5	1380
8,5	54	114	240	4,5	975	— 6,5	1160	—0,5	1530
9,5	60	126	270	3,5	1065	— 7,5	1210	—1,5	1680
10,5	66	138	315	2,5	1160	— 8,5	1260	—	—
11,5	72	150	360	1,5	1260	— 9,5	1300	—	—
12,5	78	162	410	—	—	—10,5	1340	—	—

Продолжение табл. 4

B для радиусов 0,72—2,1	1			2		3		4	
	$H_{0,72}$	$H_{1,2}$	$H_{2,1}$	$B_{4,2}$	$H_{4,2}$	$B^{у}_{8,4}$	$H^{у}_{8,4}$	$B^{г}_{8,4}$	$H^{г}_{8,4}$
13,5	84	174	470	—	—	—11,5	1380	—	—
14,5	90	186	545	—	—	—12,5	1410	—	—
15,5	95	198	630	—	—	—13,5	1440	—	—
16,5	100	210	—	—	—	—14,5	1470	—	—
17,5	105	222	—	—	—	—15,5	1500	—	—
18,5	111	234	—	—	—	—16,5	1530	—	—
19,5	117	246	—	—	—	—17,5	1560	—	—
20,5	123	262	—	—	—	—18,5	1590	—	—
21,5	129	279	—	—	—	—19,5	1620	—	—
22,5	134	296	—	—	—	—20,5	1650	—	—
23,5	139	312	—	—	—	—21,5	1680	—	—
24,5	144	329	—	—	—	—	—	—	—
25,5	148	344	—	—	—	—	—	—	—
26,5	152	360	—	—	—	—	—	—	—
27,5	157	—	—	—	—	—	—	—	—
28,5	161	—	—	—	—	—	—	—	—
29,5	165	—	—	—	—	—	—	—	—
30,5	169	—	—	—	—	—	—	—	—
31,5	173	—	—	—	—	—	—	—	—
32,5	177	—	—	—	—	—	—	—	—
33,5	181	—	—	—	—	—	—	—	—
34,5	185	—	—	—	—	—	—	—	—
35,5	189	—	—	—	—	—	—	—	—
36,5	194	—	—	—	—	—	—	—	—
37,5	198	—	—	—	—	—	—	—	—
38,5	202	—	—	—	—	—	—	—	—
39,5	206	—	—	—	—	—	—	—	—
40,5	211	—	—	—	—	—	—	—	—
41,5	215	—	—	—	—	—	—	—	—
42,5	219	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Высота центра тяжести крутильной системы $I = 0{,}6$ *м*, плотность грунта для удобства принята равной 1,0 *г/см*^{3}, радиусы — в метрах, превышения H — в миллиметрах, значения функции B — в этвешах.

3. Сравнение результатов учета влияния рельефа по разным способам

Приведем для теоретических случаев рельефа три примера (см. табл. 5).

Таблица 5

Сравнение результатов учета влияния рельефа

Способ	Конечный радиус учета (единицы I)	Поправка, этвеши	Отклонение от точного значения	δ^2
Пример 1				
Успенского Д. Г.	14	+32	—1	1
Успенского Д. Г.	28	+32	—1	1
Успенского Д. Г.	50	+32	—1	1
Нумерова Б. В.	100	+31	—2	4
Самсонова Н. Н.	9,5	+36	+3	9

Продолжение табл. 5

Способ	Конечный радиус учета (единицы l)	Поправка, этвеши	Отклонение от точного значения	δ^2
Пример 2				
Успенского Д. Г.	14	125	—0,7	0,49
Успенского Д. Г.	28	125	—0,7	0,49
Успенского Д. Г.	50	125	—0,7	0,49
Самсонова Н. Н. (рейка ГРБ)	9,5	119	—6,7	44,9
Пример 3				
Успенского Д. Г.	14	—16,8	+0,2	0,04
Успенского Д. Г.	28	—17.2	—0,2	0,04
Успенского Д. Г.	50	—17,2	—0,2	0,04
Евсеева С. В.	30	—17,3	+0,2	0,04
Нумерова Б. В.	50	—16,8	—0,3	0,09
Швейдора В.	50	—18,2	—1,2	1,44
Самсонова Н. Н.	9,5	—16,3	+0,7	0,49

Пример 1. Б. В. Нумеров [6, стр. 85] проверил свой способ на рельефе в виде наклонной плоскости с уклоном 1 : 10 от пункта наблюдения в одну сторону: в направлении $+x$ — подъем, в направлении $-x$ — горизонтальная плоскость. Для этого случая при плотности грунта 2 $г/см^3$ он определил точное значение поправки $U_{xz}=33$ этвеша.

Пример 2. Для полной наклонной плоскости с уклоном 0,15 при плотности грунта 2 $г/см^3$ можно применить известную формулу для вычисления поправки [6, 7]:

$$U_{xz}=419\cdot 10^{-9}\sigma n=419\cdot 10^{-9}\cdot 2{,}0\cdot 0{,}15=125{,}7 \text{ этвеша},$$

где σ — плотность грунта;

n — уклон наклонной плоскости.

Пример 3. С. В. Евсеев проверил свой способ на рельефе, имеющем в сечении форму полуэллипса [4]. Превышения H находятся от r в следующей зависимости:

$$H=1-\sqrt{1+0{,}20r-0{,}004r^2}.$$

С. В. Евсеев вычислил точное значение функции F по лучу для принятых условий 17,0 этвеша.

Как видно из табл. 5, по нашему способу при учете влияния рельефа до 14,28 или 50 *м* получаются очень близкие результаты в связи с тем, что во всех этих случаях мы ведем приближенный учет рельефа и за пределами последнего радиуса нивелировки. Средняя квадратическая погрешность по известной формуле получается для нашего способа $\pm 0{,}7$ этвеша. Особенно большие погрешности были получены для способа Н. Н. Самсонова.

Для случаев действительного рельефа рассмотрим два примера.

Пример 1. В курсе гравиразведки [1, стр. 195] даны поправки, полученные по способу Б. В. Нумерова. Учет проводился по восьми лучам при $l=1$ *м* и $\sigma=1{,}4$ $г/см^3$.

Этот же пример рассчитан по нашим таблицам и рассмотрены три случая учета: а) до $r=50$ *м*; б) до $r=28$ *м*; в) до $r=14$ *м*. Превышения

были получены интерполяцией. Во всех примерах рельеф за пределами последнего радиуса принимался по лучу в соответствии с таблицей превышений и учет велся для последних радиусов по $B^у$ или $B^г$ (табл. 2).

Пример 2. Учет влияния действительного рельефа был выполнен на одном из месторождений Карельской АССР (при $l=1$ *м* по восьми лучам при плотности наносов 2 *г/см*^{3}).

Учет производился:

1) по таблицам Д. Г. Успенского при начальных радиусах 0,6 или 1,2 *м* до конечного радиуса 14, 28 или 50 *м* с приближенным учетом влияния рельефа за пределами конечного радиуса $r_к$ ($B^у_к$, $B^г_к$, $B^п_к$);

2) по способу Б. В. Нумерова до конечного радиуса 18 или 50 *м* с приближенным учетом влияния рельефа за пределами конечного радиуса по нашему способу для трех случаев ($B^у_к$, $B^г_к$, $B^п_к$).

Превышения для способов Б. В. Нумерова и Д. Г. Успенского определились на местности путем отдельных нивелировок по одним и тем же лучам.

Результаты сравнения способов учета влияния рельефа приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты сравнения способов учета влияния рельефа

Способ	Радиус, *м*		Поправки, этвеши			Отклонения от среднего Δ	Δ²
	первый	последний	U_{xz}	U_{yz}	$\frac{\partial q}{\partial S}$		
Пример 1							
Успенского Д. Г. . .	1,2	50	—16,3	—28,1	32,5	0,1	0,01
Успенского Д. Г. . .	1,2	28	—16,2	—28,4	32,7	0,1	0,01
Успенского Д. Г. . .	1,2	14	—16,2	—28,4	32,7	0,1	0,01
Нумерова Б. В. . . .	1,2	50	—16,0	—23,1	32,4	0,2	0,04
	Среднее				32,6	$\sum$, по Успенскому	0,03
Пример 2							
Успенского Д. Г. . .	0,6	28	—72,4	—62,7	95,7	0,9	0,81
Успенского Д. Г. . .	1,2	28	—72,5	—64,9	97,0	0,4	0,16
Успенского Д. Г. . .	1,2	14	—71,9	—64,8	96,6	0,0	0,00
Нумерова Б. В. . . .	1,2	18	—73,0	—64,8	97,1	0,5	0,25
	Среднее				96,6	$\sum$, по Успенскому	0,97

Среднеквадратическая ошибка отдельного измерения составила:

$$m = \pm\sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n}} = \pm\sqrt{\frac{1{,}00}{0}} = \pm 0{,}4 \text{ этвеша}.$$

Таким образом, приведенные выше примеры показывают, что предложенный способ учета влияния рельефа дает очень небольшие значе-

ния среднеквадратической погрешности (±0,4—0,7 этвеша) и может быть применен при полевых работах вместо способов Н. Н. Самсонова и Б. В. Нумерова.

Заключение

1. При наблюдениях с градиентометром применять рейку Н. Н. Самсонова допустимо только в условиях очень слабо развитого рельефа с уклонами по лучам значительно меньше 1 : 10.

2. На пунктах с более сложным рельефом с уклонами по лучам свыше 1 : 10 необходим более точный способ учета влияния рельефа — по восьми лучам с тщательным определением плотности грунта.

3. При наличии как сложного рельефа с уклонами по лучам свыше 1 : 10, так и слабо развитого рельефа целесообразно применять способ, предлагаемый в настоящей статье, в разных модификациях.

4. Предлагаемый способ может применяться с использованием первого радиуса 0,6 или 1,2l, последнего радиуса нивелировки ($r_к$) 14, 28 или 50l с приближенным учетом влияния рельефа за пределами этого радиуса по таблицам $B_к^у$, $B_к^г$, $B_к^п$, с использованием специальной рейки или таблиц с подвижными шкалами.

5. В дальнейшем необходимо идти по пути разработки механизированных способов учета влияния рельефа с применением специальных видов фотограмметрической съемки с последующей обработкой снимков с помощью электрических моделирующих и быстро действующих электронных цифровых вычислительных машин [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Б. А., Закашанский М. С., Самсонов Н. Н., Фотиади Э. Э. Курс гравитационной разведки. Госгеолиздат, 1941.
2. Абельский М. Е., Андреев Б. А., Голомб В. Э., Самсонов Н. Н. Курс гравиразведки для геологоразведочных техникумов. Госгеолтехиздат, 1954.
3. Гирин С. К., Попов А. А., Садовский М. А., Успенский Д. Г. Курс гравитационной разведки. ОНТИ, 1935.
4. Евсеев С. В. Вычисление градиентов местных влияний при наблюдениях с гравитационным вариометром. Труды сейсмологич. ин-та АН СССР, 1933, № 27, 28.
5. Любимов Л. М. Нивелирный комплекс ВИТР для учета влияния рельефа местности при работе с градиентометрами. «Разведка и охрана недр», 1957, № 9.
6. Нумеров Б. В. Аналитический метод учета влияния топографических масс. Труды ГГРУ, 1931, вып. 36.
7. Справочная книга геофизика-разведчика, вып. 2. ОНТИ, 1933.
8. Поддубный С. А. Гравитационный градиентометр ГРБ-2. Сб. «Геология». Гостоптехиздат, 1957.
9. Успенский Д. Г. Пути развития гравитационного метода поисков и разведки рудных месторождений. «Советская геология», 1958, № 2.