

Э. М. ЕВСЕЕВА

Львовский политехнический институт

## ТОПОГРАФО-ИЗОСТАТИЧЕСКОЕ ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЛИЯНИЕ ДАЛЬНИХ ЗОН ( $r > 58,8$ км) НА ТЕРРИТОРИИ КАРПАТСКОГО РЕГИОНА

В результате изучения изостатического состояния Земли в целом и отдельных ее районов в частности были выявлены многие его особенности. Так, установлено, что нарушения изостатического равновесия наблюдаются в районах активного развития современных тектонических процессов. С этой точки зрения нарушение изостатического равновесия — такой же показатель современной активности того или иного региона, как и современные движения земной коры, вулканизм, сейсмичность и т. п. Анализ корелляционных связей между этими явлениями позволяет использовать данные об изостазии для решения многих задач геофизики.

Для изучения изостазии можно использовать различные методы [1]. Однако наиболее распространен классический ме-

год — вычисление изостатических аномалий силы тяжести. До недавнего времени в связи с исключительной трудоемкостью вычисления топографо-изостатических поправок карты изостатических аномалий силы тяжести составляли лишь для ограниченных территорий. Появление ЭВМ позволило ускорить необходимые вычисления и продвинуть далеко вперед исследования изостатического состояния такой огромной и разнородной территории, как СССР. Была составлена карта изостатических аномалий силы тяжести большей части территории СССР и проведена комплексная геолого-геофизическая интерпретация полученных данных. Но указанные работы не проводились западнее меридиана  $24^\circ$ , т. е. на территории Советских Карпат и Предкарпатья. Имеющиеся разрозненные данные об изостатическом состоянии Карпат [3, 4] основаны на устаревших и неполных гравиметрических исследованиях и имеют предварительный характер.

Учитывая важность изложенного выше, в настоящее время проводят работы по составлению такой карты совместно кафедры теории математической обработки геодезических измерений Львовского политехнического института и лаборатория геодинамики Львовского филиала математической физики Института математики АН УССР.

При исследовании изостатического состояния того или иного региона неизбежно возникает вопрос о выборе соответствующей схемы компенсации масс. Современные данные о строении земной коры и подкоркового слоя показывают, что ни одна из классических изостатических гипотез (Пратта, Эри, Венинг — Мейнеса) не удовлетворяет в чистом виде наблюдаемым в природе соотношениям. Тем не менее ряд исследований убедительно доказывает, что ближе всего к реальной действительности оказывается схема Эри [2, 5, 8]. Эта схема с «классическими» параметрами ( $T_0=30$  км,  $\delta_T=2,67$  г/см<sup>3</sup>,  $\delta_C=0,6$  г/см<sup>3</sup>) была принята нами для вычисления топографо-изостатических поправок на территории Карпатского региона.

В настоящей работе приведены результаты вычисления гравитационного влияния топографических и компенсационных масс, заключенных в зоны, удаленные от точки наблюдения на определенное расстояние, которое принимают равным внешнему радиусу зоны  $M$  по хейфордовскому разбиению (58,8 км). Согласно исследованиям, выполненным в работе [11], данный радиус ограничивает территорию, обычно называемую областью региональной компенсации, массы которой способны достигать изостатического равновесия. За пределами этого радиуса при вычислениях была использована система кольцевых зон Хейфорда.

Гравитационное влияние топографических и компенсационных масс, заключенных в такие зоны, определяют с помощью выражений [3]:

$$G_T = 2\pi f \delta_T \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^H \frac{2R \sin^2 \frac{\theta}{2} - h \cos \theta}{\left(4R^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + h^2 + 4Rh \sin^2 \frac{\theta}{2}\right)^{3/2}} (R+h)^2 \sin \theta d\theta dh; \quad (1)$$

$$G_C = 2\pi f \delta_C \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^{T_0+t} \frac{2R \sin^2 \frac{\theta}{2} + t \cos \theta}{\left(4R^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + t^2 - 4Rt \sin^2 \frac{\theta}{2}\right)^{3/2}} (R-t)^2 \sin \theta d\theta dh. \quad (2)$$

Здесь  $f$  — гравитационная постоянная;  $\delta_T$  и  $\delta_C$  — соответственно плотности топографических и компенсационных масс;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — границы кольцевых зон;  $R$  — радиус Земли;  $h$  и  $t$  — переменные интегрирования (соответственно высота зоны и толщина компенсационных масс);  $T_0$  — нормальная толщина земной коры, соответствующая нулевому рельефу и принятая равной 30 км.

Выражения (1) и (2) в конечном виде не интегрируются и их вычисляют либо методом нахождения среднего значения подинтегральной величины, либо путем разложения подинтегрального выражения в ряд с удержанием членов порядка  $\frac{h}{R}$  и  $\frac{t}{R}$  и последующим интегрированием. Первый метод слишком громоздок и трудоемок, а второй позволяет получать для  $G_T$  и  $G_C$  относительно простые выражения с точностью до величин второго порядка малости:

$$G_T = 2\pi f \delta_T \left\{ \left( H + 0,75 \frac{H^2}{R} \right) \left( \sin \frac{\theta_2}{2} - \sin \frac{\theta_1}{2} \right) + 0,25 \frac{H^2}{R} \left( \operatorname{cosec} \frac{\theta_2}{2} - \operatorname{cosec} \frac{\theta_1}{2} \right) \right\}; \quad (3)$$

$$G_C = -2\pi f \delta_C \left\{ \left( t - 1,5 T_0 \frac{t}{R} - 0,75 \frac{t^2}{R} \right) \left( \sin \frac{\theta_2}{2} - \sin \frac{\theta_1}{2} \right) - \left( 0,5 T_0 \frac{t}{R} + 0,25 \frac{t^2}{R} \right) \left( \operatorname{cosec} \frac{\theta_2}{2} - \operatorname{cosec} \frac{\theta_1}{2} \right) \right\}. \quad (4)$$

Знаки перед коэффициентами в формулах (3) и (4) соответствуют знакам поправок за топографию и за компенсацию, которые нужно вводить в наблюдаемые значения силы тяжести. Формулы (3) и (4) приближенные. Однако сравнение вычисленных по ним значений редукиций с полученными по таблицам Кассиниса [12] (наиболее точным из всех существующих таблиц) показало, что ошибка в значении редукиции, обусловленная удержанием малого числа членов разложения при прочих

равных источниках ошибок, не превышает 0,3 мгл. В то же время ошибка, вызываемая неточным осреднением высоты в дальних зонах, в самых неблагоприятных случаях может достигать 1 мгл в обоих методах определения редукции.

Таблицы Кассиниса сложны, требуют дополнительных вычислений и неудобны в обращении. Поэтому на основании формул (3) и (4) была составлена программа на ЭВМ «М-222» и рассчитана таблица значений топографо-изостатических редукций для зон Хейфорда за пределами радиуса 58,8 км.

В приведенной таблице аргумент  $H$  (высота) дан с шагом 100 м для промежутка 0—2000 м, что вполне достаточно для вычисления топографо-изостатического гравитационного влияния дальних зон практически во всех районах нашей планеты. Наличие такой таблицы позволяет просто и достаточно точно учитывать это влияние при разных вариациях радиуса региональной области компенсации, если это нужно.

Как видно из формул (3), (4) и таблицы, изостатическая редукция в дальних зонах приблизительно пропорциональна высоте. Отсюда следует, что находить редукцию можно не для отдельных отсеков зоны, как это делается у Хейфорда и Кассиниса, а сразу для всей зоны. Это значительно упрощает вычисления.

При вычислении с помощью приведенной таблицы топографо-изостатических поправок за влияние дальних зон на территории Карпатского региона была использована методика, предложенная нами ранее для вычисления ондуляций изостатического геоида Карпат [9—11]. Результаты вычислений позволили составить схему топографо-изостатических поправок за влияние дальних зон для указанной территории (рисунок).

М. Е. Артемьев в работе [1] отмечал, что топографо-изостатическая поправка за влияние дальних зон, взятая с обратным знаком, может рассматриваться как гравитационный эффект, создаваемый вариациями мощности земной коры в районах, удаленных от пункта наблюдения (в нашем случае более чем на 58,8 км). Как видно из рисунка, влияние этих удаленных масс на территории Карпат составляет более 20 мгл.

Гравитационное влияние топографических и компенсационных масс, удаленных от пункта наблюдения на определенное расстояние, необходимо знать для решения ряда задач и, главным образом, для изостатического редуцирования наблюдаемых значений силы тяжести, а также для вычисления так называемых аномалий Гленни, которые в ряде случаев гораздо удобнее для геологической интерпретации [7], чем более часто используемые аномалии Буге. Так, предварительные оценки мощности земной коры на территории Карпат по аномалиям Буге и Гленни показали, что аномалии Гленни дают значительно лучшие результаты [6].

Представленная на рисунке схема позволяет легко вычислять аномалии, близкие к аномалиям Гленни, путем введения

Топографо-изостатические редукции (схема Эри,  $T_0 = 30$  км,  $\delta_T = 2,67$  г/см<sup>3</sup>,  $\delta_C = 0,6$  г/см<sup>3</sup>)

Зоны

H, км	Зоны																			
	N	0	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
0,1	2,36	1,40	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,30	0,18	0,14	0,11	0,07	0,07	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00
0,2	4,76	2,83	0,46	0,44	0,42	0,40	0,39	0,60	0,36	0,28	0,21	0,14	0,14	0,07	0,06	0,06	0,04	0,04	0,02	0,00
0,3	7,20	4,29	0,70	0,66	0,63	0,60	0,59	0,91	0,55	0,43	0,32	0,21	0,21	0,10	0,10	0,08	0,06	0,05	0,03	0,00
0,4	9,69	5,77	0,94	0,89	0,85	0,82	0,79	1,22	0,74	0,58	0,42	0,29	0,29	0,14	0,13	0,11	0,08	0,07	0,04	0,01
0,5	12,22	7,28	1,18	1,12	1,07	1,03	1,00	1,54	0,93	0,73	0,55	0,36	0,36	0,18	0,16	0,14	0,10	0,09	0,05	0,01
0,6	14,79	8,81	1,43	1,36	1,30	1,25	1,21	1,86	1,12	0,88	0,66	0,44	0,44	0,22	0,20	0,18	0,12	0,11	0,06	0,01
0,7	17,41	10,37	1,68	1,60	1,53	1,47	1,42	2,19	1,32	1,04	0,78	0,52	0,52	0,26	0,23	0,21	0,15	0,13	0,07	0,02
0,8	20,07	11,96	1,94	1,84	1,76	1,70	1,64	2,52	1,53	1,20	0,90	0,59	0,55	0,29	0,27	0,24	0,18	0,15	0,08	0,02
0,9	22,77	13,57	2,20	2,09	2,00	1,92	1,85	2,86	1,73	1,36	1,02	0,67	0,67	0,33	0,30	0,27	0,20	0,17	0,10	0,02
1,0	25,52	15,20	2,47	2,34	2,24	2,16	2,08	3,21	1,94	1,53	1,14	0,76	0,76	0,37	0,34	0,30	0,22	0,19	0,12	0,02
1,1	28,31	16,86	2,74	2,60	2,49	2,39	2,31	3,56	2,15	1,69	1,27	0,84	0,84	0,41	0,38	0,33	0,25	0,21	0,13	0,02
1,2	31,14	18,55	3,01	2,86	2,74	2,63	2,54	3,92	2,37	1,86	1,40	0,92	0,92	0,46	0,42	0,37	0,27	0,23	0,14	0,02
1,3	34,02	20,26	3,29	3,13	2,99	2,87	2,77	4,28	2,59	2,04	1,53	1,01	1,01	0,50	0,45	0,40	0,30	0,25	0,15	0,02
1,4	36,94	22,00	3,57	3,39	3,25	3,12	3,01	4,65	2,81	2,21	1,66	1,09	1,09	0,54	0,49	0,44	0,33	0,27	0,16	0,03
1,5	39,90	23,77	3,86	3,67	3,51	3,37	3,25	5,02	3,03	2,39	1,79	1,18	1,18	0,58	0,53	0,47	0,35	0,29	0,17	0,03
1,6	42,91	25,59	4,15	3,94	3,77	3,62	3,50	5,40	3,26	2,57	1,92	1,27	1,27	0,63	0,57	0,50	0,38	0,31	0,19	0,03
1,7	45,96	27,38	4,44	4,22	4,04	3,88	3,75	5,78	3,50	2,75	2,06	1,36	1,36	0,67	0,61	0,54	0,40	0,34	0,20	0,03
1,8	45,05	29,22	4,74	4,51	4,31	4,14	4,00	6,17	3,73	2,93	2,20	1,45	1,45	0,72	0,65	0,58	0,43	0,36	0,21	0,04
1,9	52,19	31,09	5,05	4,80	4,59	4,41	4,26	6,56	3,97	3,12	2,34	1,54	1,54	0,76	0,69	0,62	0,46	0,38	0,23	0,04
2,0	55,37	32,98	5,35	5,09	4,87	4,68	4,51	6,96	4,21	3,31	2,48	1,64	1,70	0,81	0,74	0,66	0,49	0,40	0,24	0,04

Примечание. Значения редукций нужно брать со знаком минус.

поправки, снятой с карты, в аномалию Буге. Полученные таким образом значения будут отличаться от чистых аномалий Гленни на разность притяжения топографических масс в пределах радиуса 58,8 км вокруг точки определения и масс плоского слоя

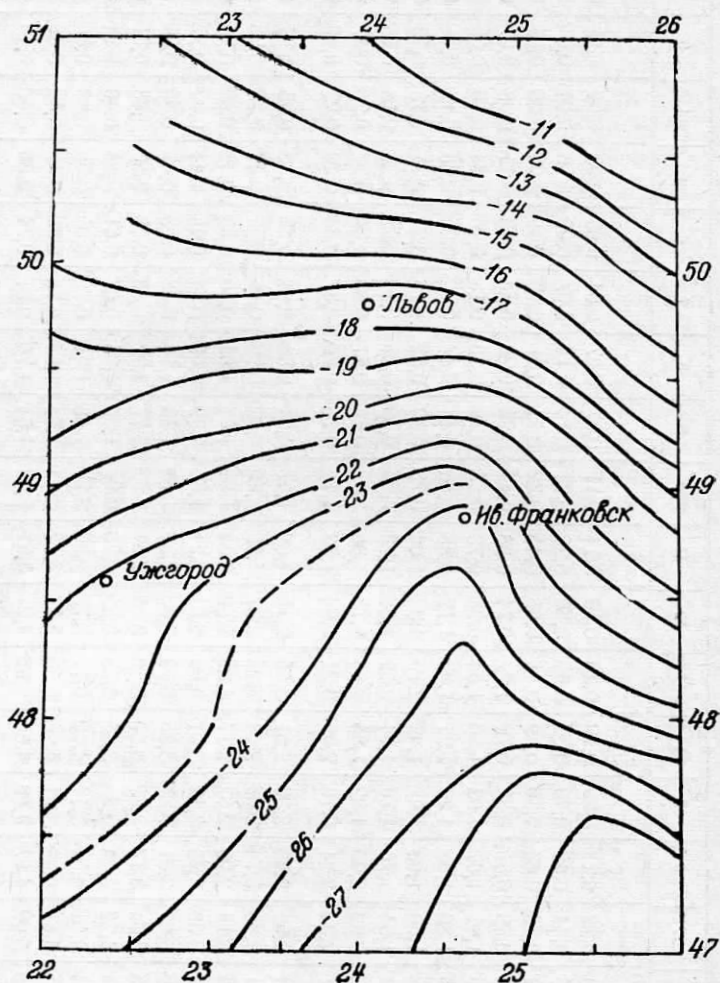


Схема топографо-изостатических поправок за влияние дальних зон ( $r > 58,8$  км).

мощностью, равной высоте точки определения, т. е. слоя, учитываемого редукцией Буге. Такие аномалии можно использовать в качестве заменителя аномалий Гленни при региональных исследованиях.

Если же точно вычислить гравитационное влияние топографических масс в пределах радиуса 58,8 км, что неизбежно выполняется при изостатическом редуцировании, то чистые ано-



малии Гленни получают как попутный результат при вычислении изостатических аномалий.

Принимая во внимание результаты исследований, приведенных в работе [6], вычисление аномалий Гленни на территории Карпатского региона позволит существенно уточнить существующие карты поверхности Мохоровичича.

**Список литературы:** 1. *Артемьев М. Е.* Изостазия территории СССР. М., «Наука», 1975. 2. *Вуллард Дж. П.* Стандартизация измерений силы тяжести. — В кн.: Земная кора и верхняя мантия. М., «Мир», 1972. 3. *Евсеев С. В.* Сравнительная характеристика различных аномалий силы тяжести Предкарпатья. — «Геофизич. сборник АН УССР», 1952, № 1. 4. *Евсеев С. В., Сигалова Р. М.* О связи между локальными аномалиями силы тяжести и элементами сейсмичности в Закарпатье. — «Геофизич. сборник АН УССР», 1970, № 35. 5. *Евсеев С. В.* Про визначення параметрів ізостатичної редукції. — «Доп. АН УРСР, серія «Б»», 1974, № 11. 6. *Евсеев С. В.* О способах определения рельефа поверхности Мохоровичича. — «Геофизич. сборник АН УССР», 1977, № 78. 7. *Люстих Е. Н.* Геологический смысл различных методов вычисления аномалий силы тяжести. — «Тр. ин-та теоретич. геофизики АН СССР», 1947, вып. 3. 8. *Рингвуд А. Е.* Состав и эволюция верхней мантии. — В кн.: Земная кора и верхняя мантия. М., «Мир», 1972. 9. *Шаталова Э. М.* О смещении уровня поверхности (геоида) под влиянием топографической редукции. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1971, вып. 14. 10. *Шаталова Э. М.* К вопросу о деформации геоида. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1972, вып. 15. 11. *Шаталова Э. М.* Карта «изостатического геоида» в районе Карпат. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1973, вып. 17. 12. *Cassinis G., Dore P., Ballarin S.* Tavole fondamentali per la riduzione dei valori osservati della gravita. — «Publ. dell'istituto di Topogr. e Geod.», 1937, № 22.

Работа поступила 6 мая 1977 года. Рекомендована кафедрой теории математической обработки геодезических измерений Львовского политехнического института.