

Э. М. ЕВСЕЕВА

О ЗНАЧЕНИИ ДЕТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ГЕОИДА ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

В настоящее время ставится вопрос о том, что при изучении коры и мантии Земли нужно учитывать поправки за ондуляции геоида, так как вклад последних в гравитационное поле Земли по подсчетам Дж. Вулларда [2] — 10—20 мгл. Это требует, с одной стороны, детального изучения самого геоида и составления соответствующих карт, а с другой — выяснения глубины расположения аномальных масс, вызывающих ондуляции геоида.

Форму уровенной поверхности (геоид), которую необходимо знать для решения многих геодезических и геофизических задач, до недавнего времени изучали или путем наземных геометрических построений (триангуляций, трилатераций), или по результатам измерений силы тяжести на поверхности Земли. В послед-

нее время основную информацию о геоиде и гравитационном поле Земли мы получаем так называемыми околоземными геометрическими методами, то есть по результатам наблюдений за ИСЗ. В течение последних двух-трех лет сделан обзор сведений о гравитационном поле Земли, которые доставляют нам ИСЗ [1, 9, 10, 11], и установлено:

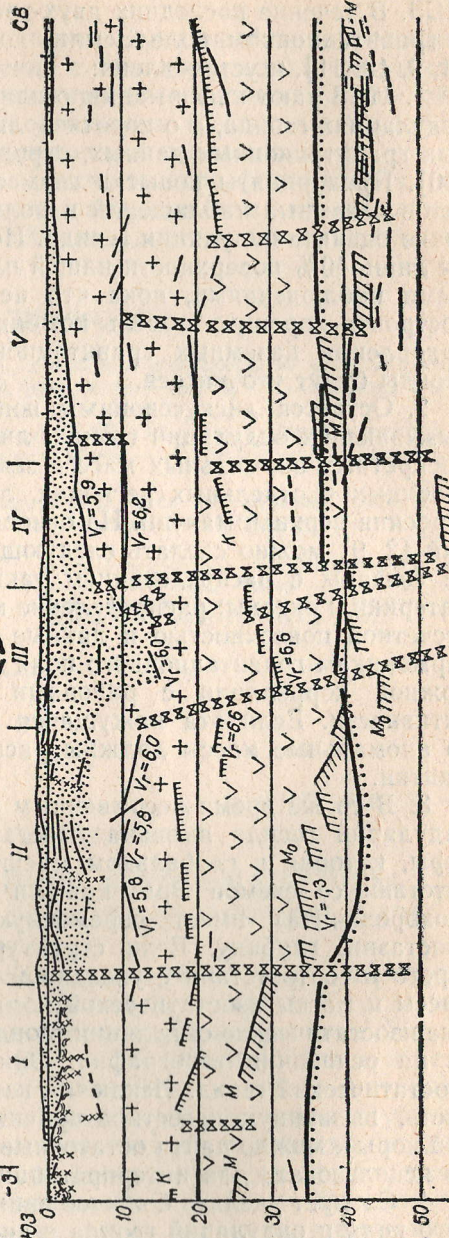
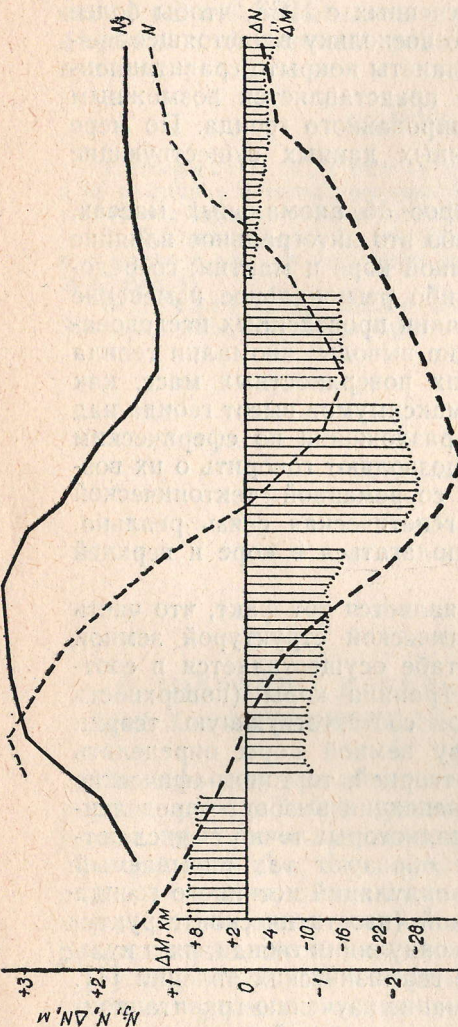
1. ИСЗ дают информацию о длинноволновых (более 1000 км) ондуляциях геоида, а о коротковолновых мы получаем из наземных гравитационных данных, осредненных по площадкам $1^\circ \times 1^\circ$ [10]. Предприняты попытки совместного использования результатов наземных наблюдений и полученных с ИСЗ, чтобы более точно оценить ондуляции геоида. Но поскольку в настоящее время лишь 40% поверхности нашей планеты покрыто гравитационными наблюдениями, пока что не представляется возможным построить хорошую модель комбинированного геоида. По мере накопления наземных гравитационных данных существующие геоиды будут уточняться.

2. Остается дискуссионным вопрос об аномальных массах, вызывающих ондуляции геоида: либо это интегральное влияние дискретных аномальных масс в земной коре и мантии, сосредоточенных в отдельных регионах, либо региональное изменение строения верхней мантии. На основании проведенных исследований [2, 9] можно сделать следующие выводы: аномалии геоида не связаны с распределением таких поверхностных масс, как материки и океаны; распределение максимумов высот геоида над отчетной поверхностью и данные разложения по сферическим гармоникам гравитационного поля позволяют говорить о их возможной корреляции с районами современной тектонической активности. Если эта кажущаяся генетическая связь реальна, то аномальные массы должны располагаться в коре и верхней мантии.

3. В то же время несомненным является тот факт, что часть ондуляций геоида вызвана изостатической структурой земной коры, которая в глобальном масштабе осуществляется в соответствии со схемой Эри: нижняя граница коры (поверхность Мохоровичича) имеет переменную, соответствующую теории изостазии, глубину. Если структуру земной коры определять строго в соответствии с указанной теорией, то топографические массы и массы изостатической компенсации вызовут определенные изостатические ондуляции геоида, которые точно вычисляются на основании топографии. Они образуют так называемый изостатический геоид. Исключая из ондуляций истинного геоида часть, вызванную известной причиной (изостатической структурой коры), можно найти остаточные ондуляции геоида, их и нужно использовать для интерпретации геофизических явлений [1].

4. Следует уделять большое внимание изучению гравитационного поля и ондуляций геоида в аномальных районах, выявленных по данным, полученным с ИСЗ, уточнять эти районы с помощью наземной информации, а также ставить вопрос о де-

- 1 [stippled pattern]
- 2 [cross-hatched pattern]
- 3 [horizontal line pattern]
- 4 [inverted triangle pattern]
- 5 [diagonal line pattern]
- 6 [rectangle with X pattern]
- 7 [horizontal line pattern]
- 8 [solid line pattern]
- 9 [dashed line pattern]
- 10 [inverted triangle pattern]
- 11 [vertical line pattern]



тальном изучении указанных характеристик в тектонически активных районах и в районах со сложной геологической ситуацией [11].

В настоящей статье приводятся результаты изучения глубинного строения земной коры по ондуляциям геоида на территории весьма интересного в тектоническом отношении Карпатского региона. Ранее была составлена карта изостатического геоида Карпат [8], которая представляет ондуляции геоида, вызываемые массами топографии и компенсацией их по схеме Эри. Из теории фигуры Земли известно, что изостатический геоид отличается от истинного тем больше, чем больше действительное строение масс отличается от принятой схемы изостатической компенсации масс [6]. Следовательно, если выбранная схема компенсации масс хорошо согласуется с глубинным строением региона, отклонения действительного геоида от изостатического (остаточные ондуляции) будут характеризовать отклонения от изостатического равновесия.

На основании данных по глубинному сейсмическому зондированию на территории Карпатского региона [7] можно считать, что для изостатических подсчетов лучше всего брать схему Эри. Действительно, как видим из рисунка, под Карпатами имеет место увеличение мощности земной коры (погружение границы Моховичича).

Мы вычислили ондуляции изостатического геоида при уточненных параметрах изостатической редукиции по Эри (нормальная толщина земной коры $T_0 = 34,4$ км; плотность топографических масс Карпат $\delta_T = 2,56$ г/см³; скачок плотности на границе кора—мантия $\delta_C = 0,43$ г/см³). Изменение этих ондуляций N_j по профилю ГСЗ показаны на рисунке сплошной тонкой линией. Здесь же отмечено положение границы Мохо при условии осуществления изостатического равновесия на территории Карпатского региона. Эта «нормальная» граница рассчитана согласно уравнению

$$T = 34,4 + 6,78h, \quad (1)$$

полученному на основании статистической обработки данных ГСЗ по всему миру, включая Карпатский регион. Коэффициенты этого уравнения хорошо согласуются с указанными выше параметрами изостатической редукиции. Уклонения «нормальной» границы от реальной (аномалии Мохо, ΔM) показаны на рисунке штриховкой для основных геоструктурных единиц региона (блоков): I — Закарпатского прогиба, II —

Складчатых Карпат, III — Предкарпатского передового прогиба, IV — Львовского палеозойского прогиба, V — западной окраины

Сейсмический разрез земной коры по III профилю ГСЗ [7] и кривые N_j , ΔM :
1 — осадочный слой, 2 — «гранитный» слой, 3 — раздел Конрада, 4 — «базальтовый» слой, 5 — раздел Моховичича, 6 — основные глубинные разломы, 7 — теоретическое положение границы Моховичича, 8 — ондуляции изостатического геоида, 9 — локальные ондуляции реального геоида, 10 — остаточные локальные ондуляции, 11 — аномалии Мохо для основных геоструктурных единиц.

Восточно-Европейской платформы. Аномалии ΔM являются характеристикой отклонения от изостатического равновесия, определенной по экспериментальным данным. Так, максимальная по абсолютной величине аномалия ΔM , соответствующая Предкарпатскому прогибу, говорит о его максимальной неуравновешенности.

Как указывалось выше, характеристикой отклонения от изостатического равновесия могут служить и остаточные ондуляции геоида (реальный геоид минус изостатический). Для того, чтобы это показать, необходимо было найти ондуляции действительного геоида на территории Карпат. Мы воспользовались формулой Стокса

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_0^\pi \int_0^\pi \Delta g S(\psi) \sin \psi d\psi dA. \quad (2)$$

Обычно при вычислениях по формуле (2) интеграл делят на три части [5]:

$$N = \frac{1}{2\pi\gamma} \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \Delta g dr dA + \frac{1}{2\pi\gamma} \int_{r_0}^{r_1} \int_0^{2\pi} \Delta g F(r) dr dA + \\ + \frac{R}{2\pi\gamma} \int_{\psi_1}^\pi \int_0^{2\pi} \Delta g F(\psi) d\psi dA, \quad (3)$$

где первый член представляет влияние центральной зоны ($r_0 = 5$ км), второй — области $5 < r < 2000$ км, третий — дальних зон ($\psi > 20^\circ$). Как правило, в большинстве случаев 3-м членом пренебрегают. Мы ограничились радиусом интегрирования $r_1 = 58,8$ км во втором члене формулы (3) и считали его радиусом региональной компенсации при вычислении ондуляций изостатического геоида [8].

Принимая во внимание тот факт, что изучаемый район очень мал по сравнению с размерами всей Земли, влияние неучитываемых зон, очевидно, должно быть либо постоянным, либо очень медленно меняющимся. Наши подсчеты подтверждают такое предположение: влияние зон, учитываемых третьим членом формулы (3), постоянно для данного региона, а суммарным влиянием масс за пределами радиуса $r_1 = 58,8$ км можно пренебречь, поскольку ондуляции геоида, вызываемые этими массами, меняются медленно и плавно на изучаемой территории (на площади $4^\circ \times 4^\circ$ геоид равномерно понижается с северо-запада на юго-восток).

Таким образом, вычисленные по формуле (3) высоты геоида N при $r_1 = 58,8$ км будут отражать только локальные влияния местности. Поскольку эти величины не совпадают с общепринятым

понятием о высотах геоида, мы назвали их локальными ондуляциями действительного геоида. Изменение их по профилю ГСЗ показано на рисунке тонкой штриховой линией. Как видим, локальные ондуляции геоида в общих чертах отражают глубинную структуру региона. Правда, региональный минимум, соответствующий III блоку (Предкарпатскому прогибу), отмечаемый локальными ондуляциями, несколько сдвинут к востоку. Третья кривая на рисунке (жирная штриховая линия) — остаточные локальные ондуляции геоида, полученные вычитанием из локальных ондуляций действительного геоида ондуляций изостатического геоида, вычисленных тоже в пределах указанного выше радиуса региональности. Изменение этих остаточных локальных ондуляций ΔN по профилю ГСЗ достаточно точно согласуется с изменением границы Мохоровичича. Аномалии Мохо хорошо вписываются в кривую изменения остаточных локальных ондуляций.

Действительно, III блок имеет максимальное отрицательное значение аномалии Мохо (в среднем $\Delta M = -24$ км) и ему же соответствует максимальное отрицательное значение остаточной локальной ондуляции ($\Delta N = -3$ м). Знаки остаточных локальных ондуляций геоида на территории всех блоков региона тоже хорошо согласуются со знаками аномалий Мохо (см. рисунок). На территории II блока (Складчатые Карпаты) наблюдается смена знаков остаточных локальных ондуляций, то есть II блок проходит через границу равновесия, что соответствует пересечению кривой изменения остаточных локальных ондуляций с нулевой линией. Но граница Мохо в этом блоке занижена по сравнению с нормальным ее положением в среднем на 14 км, что говорит о достаточно ощутимом отклонении от равновесия. Геофизики прослеживают в этом блоке другую границу M_0 (см. рисунок), более древнюю в геологическом отношении, расположенную гораздо выше раздела Мохо и близкую к нему по своим кинематическим свойствам [7]. Этот раздел M_0 считается изостатически уравновешенным, с ним, видимо, и связано нулевое значение остаточной локальной ондуляции, а также нулевая изостатическая аномалия [3]. Раздел Мохо, образовавшийся в более позднее геологическое время, очевидно, является причиной довольно интенсивного уменьшения остаточных локальных ондуляций геоида к востоку, к Предкарпатскому прогибу. Нам представляется, что такие блоки коры, как Складчатые Карпаты, находящиеся между уже сложившимися геологическими блоками (территория, расположенная к востоку) и еще несложившимися, активными блоками, как Закарпатский прогиб, требуют более тщательного комплексного изучения, для того чтобы увязать все имеющиеся характеристики региона.

Таким образом, остаточные локальные ондуляции геоида достаточно четко фиксируют изменение глубинной границы земной коры (поверхности Мохоровичича) и, следовательно, представляются весьма полезными для изучения земной коры, в частно-

сти, отклонений от изостатического равновесия. В силу своей региональности они, на наш взгляд, более пригодны для указанных выше целей, чем изостатические аномалии, несущие в себе гораздо большую информацию и часто ненужную при региональных исследованиях. И, наконец, остаточные локальные ондуляции геоида можно рекомендовать для прогнозных исследований глубинного строения регионов, где нет глубинного сейсмического зондирования, которое является дорогостоящим методом исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнольд К. Методы спутниковой геодезии. М., «Недра», 1973.
2. Вуллард Дж. П. Стандартизация измерений силы тяжести. Земная кора и верхняя мантия. М., «Мир», 1972.
3. Евсеев С. В. Сравнительная характеристика различных аномалий силы тяжести Предкарпатья. — «Геофизический сборник», 1953, № 1.
4. Евсеев С. В. Про визначення параметрів ізостатичної редукції. — ДАН УРСР, 1974, № 1.
5. Еремеев В. Ф. Расчет палетки для вычисления высот квазигеоида и уклонений отвеса по формулам Стокса и Венинг Мейнеса. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1957, вып. 121.
6. Михайлов А. А. Курс гравиметрии и теории фигуры Земли. М., 1939.
7. Соллогуб В. Б. Структура земной коры Украины. — «Геофизический сборник», 1970, № 38.
8. Шаталова Э. М. Карта «изостатического геоида» Карпат. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1973, № 17.
9. Kaula W. M. Geophysical implication of satellite determination of the Earth's gravitational field. — «Space Sci. Rev.», 1967, 7.
10. Marsh J. G., Vinsent S. Global detailed Geoid computation and modal Analysis. — «Geophys. Surv.», 1974, vil. 1, № 4.
11. Woollard D. P., Khan M. A. Review of Satellite-derived figures of the Geoid and Their Geophysical Significance. — «ACI Journ.», 1973.

Работа поступила в редколлегию 2 апреля 1976 года. Рекомендована кафедрой теории математической обработки геодезических измерений Львовского политехнического института.