

ПОСТРОЕНИЕ КВАЗИГЕОИДА НА РЕГИОН РЕСПУБЛИКИ МОЛДОВА. УТОЧНЕННОЕ РЕШЕНИЕ MOLDGEO2004A

© Марченко А.Н., Монин И.И., 2004

Решение MOLDGEO2004A для высот квазигеоида и аномалий силы тяжести было получено на основе метода регуляризации в виде регулярной сетки (1'×1.5'). В качестве исходных данных использована сеть с 1200 пунктов GPS-нивелирования в регионе Молдовы и модифицированный квазигеоид EGG97 вокруг республики. За результатами независимых сравнений указанная сетка MOLDGEO2004A обеспечивает точность интерполяции высот квазигеоида < 1дм.

Quasigeoid heights and gravity anomalies in Moldova area, called here as the solution MOLDGEO2004A, was constructed in the form of (1'×1.5') grid. This solution was obtained by means of the regularization method from the inversion of 1200 GPS-leveling points covering the Moldova region and modified EGG97 quasigeoid heights surrounding this area. MOLDGEO2004A regional gravity field provides a good accordance of < 1 decimeter from the comparison with independent GPS-leveling data scattered on the whole Moldova.

Введение

Постановка проблемы и ее связь с важными научными и практическими задачами. В 2001 г. на симпозиуме EUREF2001 (г. Дубровник) была принята резолюция по фактическому созданию модели (квази)геоида, описывающего Европейскую Вертикальную Референционную Систему EVRS (European Vertical Reference System) с дециметровым уровнем точности. Кроме того, на Генеральной Ассамблее IUGG и IAG в 2003г. принято решение о создании нового (повышенной точности) Европейского квазигеоида вместо решения EGG97 [3]. Один из возможных подходов решения поставленной задачи – это использование высокоточных данных GPS-нивелирования как данных измерений, доставляющих возможность реального

приведения гравиметрических решений высокой детализации (например, Европейского квазигеоида EGG97) к некоторому абсолютному уровню. Отметим то существенное обстоятельство, что, судя по Рис.1 (см. [5]), распространение EVRS на такие страны, как Ирландия, Югославия, Болгария, Греция, Турция, Россия (за исключением Калининградской обл.), Белоруссия, Украина и Молдова по-видимому еще не реализовано с необходимой дециметровой точностью. В целом, указанные на Рис.1 точности уже удовлетворяют требованиям GPS и GIS индустрии в случае ряда заинтересованных фирм (GeoNav, Leica, Trimble, Topcon и др., – см. [6]) прямого преобразования геодезических высот в нормальные высоты, отсчитываемые относительно выбранного футштока (Амстердамского, – в случае EVRS).

Анализ последних достижений и нерешенные задачи. Следует подчеркнуть, что подобный подход фактически был развит в [6] на базе так называемой концепции DFHRS (Digital-FEM-Height-Reference-Surface), основанной на использовании метода конечных элементов (FEM) для построения некоторой непрерывной поверхности (Height-Reference-Surface), представляющей практически кусочно-гладкую аппроксимацию разностей геодезических и нормальных высот (т.е. высот квазигеоида) в заданном конечном числе пунктов GPS-нивелирования. Рис.1 (см. [5]) иллюстрирует достигнутые качественные характеристики (< 1 дм) такой аппроксимации с прямым использованием Европейского квазигеоида EGG97 [3] для ряда Европейских стран и решения [4], реализующего EVRS с точностью около 5 см.

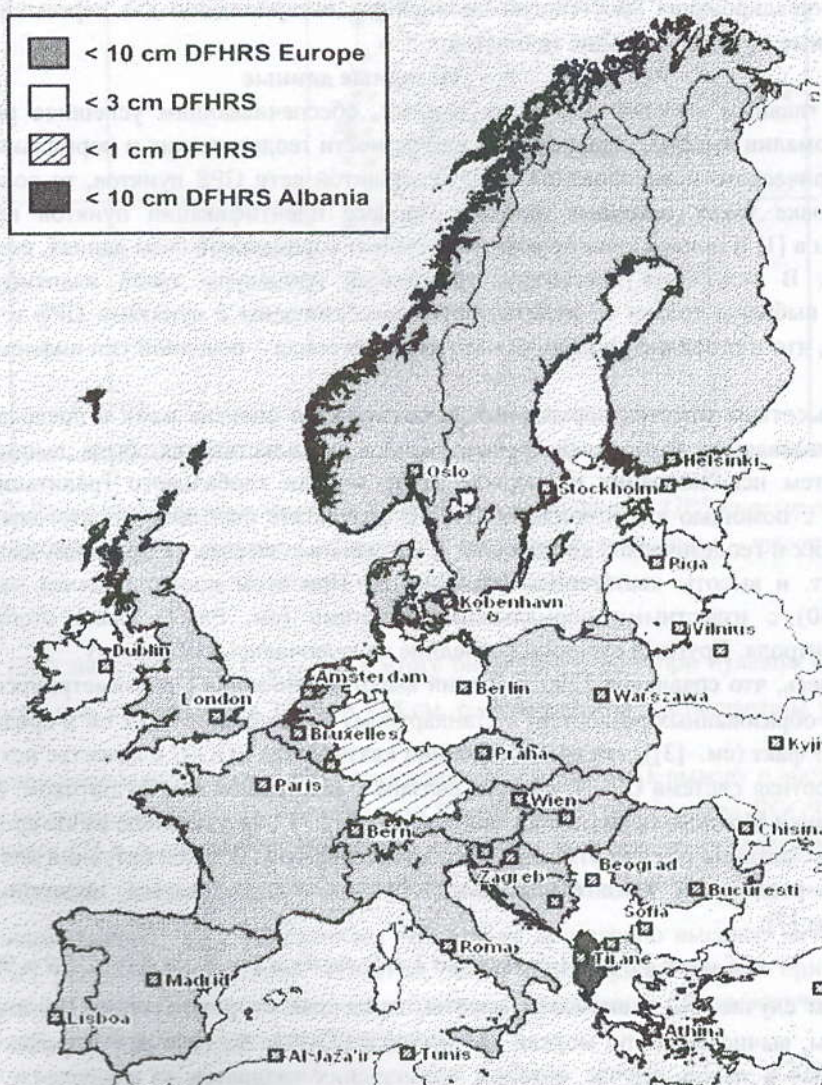


Рис.1. Точностные характеристики (принятые здесь в соответствии с[5]) аппроксимации Европейской сети GPS-нивелирования квазигеоидом EGG97 на базе концепции DFHRS

Учитывая последнее обстоятельство, а также факт отсутствия решения подобного качества (см. [1]) для региона Республики Молдова, в настоящей работе поставлена и решена задача вычисления высот квазигеоида

с точностью < 1 дм по информации о достаточно детальном наборе данных GPS-нивелирования внутри Молдовы и Европейского квазигеоида EGG97, окружающего изучаемый регион. Отметим здесь, что наследие геодезической изученности в республике Молдова представляет собой лишь каталоги координат плановой и высотной основы различной степени точности, а материалы обработок и уравнивания полевых измерений практически отсутствуют. Высотная сеть не обновлялась. Тем не менее, в последние годы в стране создана геодезическая сеть на основе GPS измерений, состоящая к настоящему времени из ~1200 GPS пунктов 0-го, 1-го, 2-го и 3-го классов, совмещенных с пунктами нивелирования, представляющих на 97% результаты нивелировок IV класса. За основную систему принята система координат ETRS89.

Постановка задачи. Существенным отличием от отмеченного подхода DFHRS [6], в котором информация о высотах квазигеоида постулируется заданной, при решении обсуждаемой задачи было прямое использование метода средней квадратической коллокации [2] с регуляризацией [8] для прогнозирования высот квазигеоида и их инверсии в аномалии силы тяжести на регулярный грид ($1' \times 1.5'$) по хаотически распределенным высотам квазигеоида, полученным из GPS-нивелирования в регионе самой Молдовы, а также окружающим республику высотам квазигеоида EGG97 (предварительно трансформированным в Балтийскую (1977г.) систему высот на базе хорошо известного преобразования исходных геодезических дат). Таким образом, построение регулярного грида для высот квазигеоида с указанной плотностью и точностью лучше 1 дм было основным требованием данной работы, позволяющим использовать в дальнейшем вместо традиционного нивелирования простейшую билинейную интерполяцию для перевычисления геодезических высот в нормальные с указанной выше точностью.

Исходные данные

Поскольку главным набором исходных данных, обеспечивающим успешное решение поставленной задачи, были аномалии высоты, определенные как разности геодезических и нормальных высот, полученных методом геометрического нивелирования для уже развитой сети GPS пунктов, то основное внимание было уделено подготовке таких исходных данных. Процесс идентификации пунктов по данным различных каталогов описан в [1] и привел, практически, к созданию специальной базы данных, реализованной в системе Oracle Database. В результате достаточно громоздкой процедуры такой идентификации из высотных каталогов были выбраны только те пункты, которые совмещены с пунктами GPS и имеют отметки в СВ "Балтийская 77", что и позволило получить высоты квазигеоида – основной тип информации, используемой в данной работе.

Точность высотных отметок нормальных высот пунктов оценена нами в пределах 4 - 8 см. Учитывая необходимость выявления возможных грубых ошибок отождествления, была выполнена браковка части пунктов как путем использования на первом этапе модели глобального гравитационного поля EGM96 (360,360), так и с помощью квазигеоида EGG97. В результате был получен итоговый набор из 1200 GPS пунктов, имеющих и геодезические координаты и нормальные высоты (с принятой далее средней точностью ~6 см), а значит, и высоты квазигеоида (см. Рис. 2). При этом дополнительная часть таких пунктов (в количестве = 30) с известными нормальными высотами (см. Рис.2), была отобрана для проведения независимого контроля. Другими словами, последние не включались в обработку.

Отметим здесь, что сравнение 1200 значений высот квазигеоида с гравиметрическим решением EGG97 [3] привело (для образованных разностей) к стандартному отклонению $\sigma = 10.2$ см и среднему отклонению = -23 см. Учитывая тот факт (см. [3]), что при построении квазигеоида EGG97 в качестве исходной использовалась Европейская высотная система UELN, которая связана с Амстердамским фудштоком, а в качестве высотной системы Республики Молдова принята система "Балтийская 77", то указанное выше среднее отклонение -23см можно объяснить частично именно отмеченным обстоятельством. В такой ситуации для более состоятельного сравнения двух реализаций квазигеоида целесообразно воспользоваться простейшим преобразованием геодезических дат [7]:

$$\zeta_{GPS} = \zeta_{EGG97} + \delta x \sin \vartheta \cos \lambda + \delta y \sin \vartheta \sin \lambda + \delta z \cos \vartheta, \quad (\vartheta = 90^\circ - \phi), \quad (1)$$

где в нашем случае ζ_{GPS} – аномалия высоты, найденная по результатам GPS-нивелирования; ζ_{EGG97} – аномалия высоты, вычисленная по модели квазигеоида EGG97, δx , δy и δz – хорошо известные параметры сдвига, находимые в нашем случае методом наименьших квадратов из переопределенной системы 1200 параметрических уравнений (1) с тремя неизвестными δx , δy и δz . Выполнив такую процедуру, можно найти в результате преобразованные аномалии высоты:

$$\zeta_{EGG97}^{mod} = \zeta_{EGG97} + \delta x \sin \vartheta \cos \lambda + \delta y \sin \vartheta \sin \lambda + \delta z \cos \vartheta. \quad (2)$$

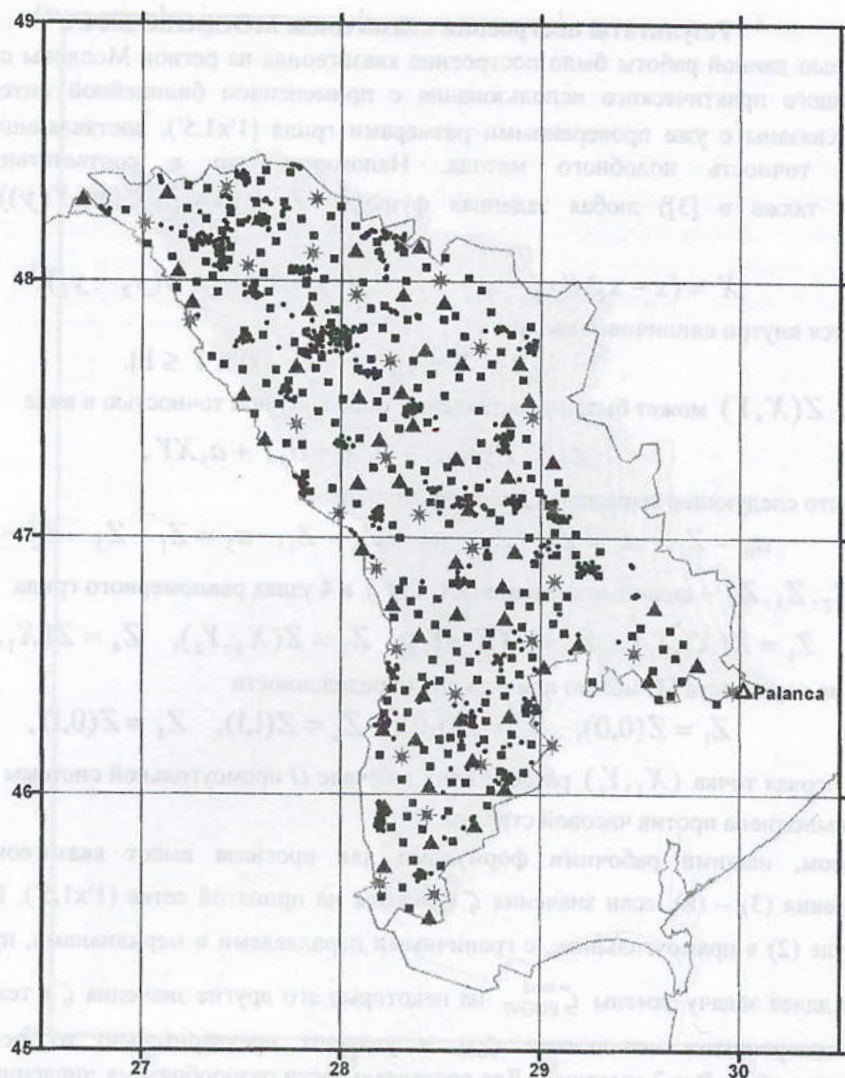


Рис. 2. Распределение измеренных аномалий высот по данным GPS-нивелирования:

Δ – пункты 0-го класса; % – пункты 1-го класса; ! – пункты 2-го класса; • – пункты 3-го класса;
* – пункты независимого сравнения

После сравнения 1200 значений ζ_{GPS} с ζ_{EGG97}^{mod} в итоге было получено – при нулевом среднем, а также максимальном и минимальном уклонениях в 37 см и –38 см, соответственно, – стандартное уклонение $\sigma=9.8$ см.

Таким образом, приведенные выше результаты двух сравнений приводят к выводу о достаточно высокой точности (~1дм) представления значений ζ_{GPS} с помощью Европейского квазигеоида EGG97 в целом и его модифицированной версии (2) в особенности. Последнее привело к мысли о непосредственном включении значений ζ_{EGG97}^{mod} , окружающих регион Молдовы (см. Рис.2), в число исходной “измерительной” информации наряду с 1200 аномалиями высоты ζ_{GPS} , обеспечивая тем самым достаточно высокое качество изучаемой функции в пограничных регионах республики. Отметим также иную существенную причину подобного подхода: в нашем распоряжении практически отсутствовали надежные гравиметрические данные с необходимой детализацией, окружающие изучаемый регион.

Таким образом, ниже были использованы следующие наборы данных: (1) – 1200 значений ζ_{GPS} , полученных из данных GPS-нивелирования с принимаемой средней точностью их определения $\sigma=6$ см; (2) – модифицированные аномалии высот ζ_{EGG97}^{mod} Европейского квазигеоида EGG97 на гриде (1'x1.5'), окружающего изучаемый регион Молдовы, с принимаемой точностью их определения $\sigma=10$ см.

Результаты построения квазигеоида MOLDGEO2004A

Поскольку целью данной работы было построение квазигеоида на регион Молдовы с точностью <1 дм для его последующего практического использования с применением билинейной интерполяции, то все вычисления были связаны с уже проверенными размерами грида ($1' \times 1.5'$), доставляющими необходимую методологическую точность подобного метода. Напомним, что в соответствии с последним (рекомендованным также в [3]) любая заданная функция $Z(x, y) = Z(X(x), Y(y)) = Z(X, Y)$ после преобразования

$$X = (x - x_1)/(x_2 - x_1), \quad Y = (y - y_1)/(y_2 - y_1), \quad (3)$$

рассматривается внутри единичного квадрата

$$[0 \leq X \leq 1], \quad [0 \leq Y \leq 1]. \quad (4)$$

В этом случае $Z(X, Y)$ может быть представлена с определенной точностью в виде

$$Z(X, Y) = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 XY, \quad (5)$$

где имеют место следующие выражения для коэффициентов

$$a_0 = Z_1, \quad a_1 = Z_2 - Z_1, \quad a_2 = Z_4 - Z_1, \quad a_3 = Z_1 + Z_3 - Z_2 - Z_4, \quad (6)$$

причем Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 – заданные значения $Z(X, Y)$ в 4 узлах равномерного грида

$$Z_1 = Z(X_1, Y_1), \quad Z_2 = Z(X_2, Y_1), \quad Z_3 = Z(X_2, Y_2), \quad Z_4 = Z(X_1, Y_2). \quad (7)$$

С точки зрения неравенств (4) можно принять для определенности

$$Z_1 = Z(0,0), \quad Z_2 = Z(1,0), \quad Z_3 = Z(1,1), \quad Z_4 = Z(0,1), \quad (8)$$

полагая, что первая точка (X_1, Y_1) расположена в начале O прямоугольной системы координат XY если нумерация точек выполнена против часовой стрелки.

Таким образом, нашими рабочими формулами для прогноза высот квазигеоида $\zeta = Z(X, Y)$ становятся выражения (3) – (8), если значения ζ известны на принятой сетке ($1' \times 1.5'$). Вычислив значения $\zeta_{EGG97}^{\text{mod}}$ по формуле (2) в прямоугольнике, с граничными параллелями и меридианами, представленными на Рис.2, мы ставим далее задачу замены $\zeta_{EGG97}^{\text{mod}}$ на некоторые его другие значения ζ в тех же точках, которое согласованы с измеренными величинами ζ_{GPS} и удалены предварительно из региона республики, ограниченного принятой на Рис.2 границей. Для состоятельности разнообразных численных сравнений после указанной замены основным выражением для всех вычислений становится интерполяционная формула (5) на основе такого комбинированного грида из $\zeta_{EGG97}^{\text{mod}}$ вокруг Молдовы и значениях ζ , рассчитанных на основе ζ_{GPS} внутри Молдовы.

В основу принятого метода расчета ζ на базе ζ_{GPS} внутри Молдовы был положен метод регуляризации в соответствии с [8], использованный в рамках широко известной процедуры “Remove-Restore” с дополнительным уточнением ковариационной функции.

На первом этапе на основе значений аномалий высоты ζ были образованы разности $\delta\zeta = \zeta - \zeta_{EGM96}$, где высоты квазигеоида ζ_{EGM96} были вычислены по модели EGM96 (360,360) до 360 порядка и степени включительно. Построение эмпирической (ЭКФ) и аналитической (АКФ) ковариационных функций $\delta\zeta$ было выполнено на втором этапе. Далее, метод регуляризации был использован для прогноза $\delta\zeta$ и остаточных значений $\delta\Delta g$ на равномерной сетке ($1' \times 1.5'$).

На следующем шаге было выполнено уточнение ЭКФ и АКФ на основе только полученного набора аномалий силы тяжести. На последнем этапе был выполнен прогноз значений $\delta\zeta$ и $\delta\Delta g$ на равномерной сетке ($1' \times 1.5'$) и выполнено восстановление поля высот квазигеоида $\zeta = \delta\zeta + \zeta_{EGM96}$ и аномалий силы тяжести $\Delta g = \delta\Delta g + \Delta g_{EGM96}$ на принятом гриде.

Таким образом, в результате приведенной выше последовательности вычислений, было получено решение MOLDGEO2004A для высот квазигеоида и аномалий силы тяжести на регулярном гриде ($1' \times 1.5'$). Рис. 3 иллюстрирует высоты квазигеоида MOLDGEO2004A, а Рис.4 – поле аномалий силы тяжести. Здесь следует отметить несомненно большую детализацию решения MOLDGEO2004A, нежели квазигеоида EGG97. Таблица 1 демонстрирует основные статистики полученных значений ζ и Δg в регионе Молдовы.

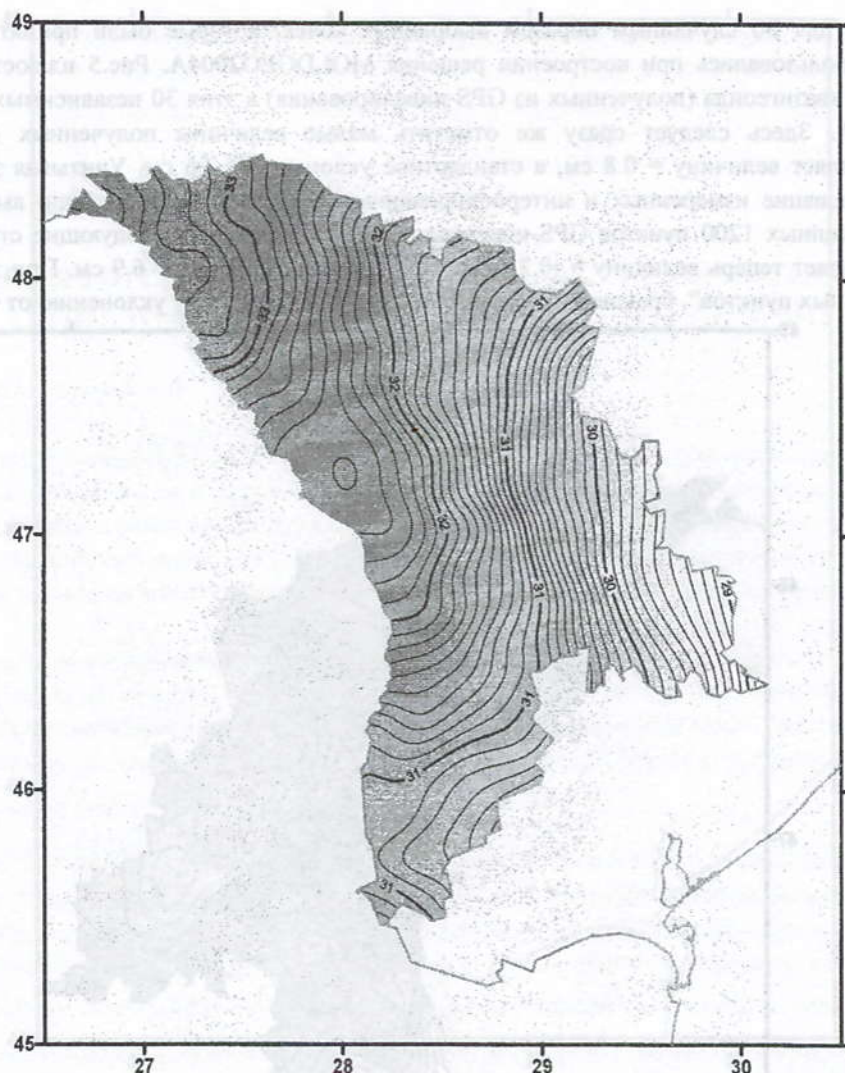


Рис.3. Аномалии высоты ζ в соответствии с решением MOLDGEO2004A (изолинии проведены через 0.1 м)

Таблица 1

Статистики высот квазигеоида и аномалий силы тяжести решения MOLDGEO2004A

Статистики	ζ , м	Δg , мГал
Минимум	28.86	-29.82
Максимум	33.61	36.49
Среднее	31.50	7.40
Стандартное уклонение	1.07	12.15

Заключение

Таким образом, решение MOLDGEO2004A было получено в результате прогноза методом регуляризации аномалий высоты ζ_{2004A} и аномалий силы тяжести Δg_{2004A} по измеренным величинам ζ_{GPS} внутри региона Молдовы (Рис.2) на равномерную сетку (1'x1.5'). После замены величин ζ_{EGG97}^{mod} внутри указанного региона неправильной формы на эти новые значения ζ_{2004A} был составлен комбинированный грид (1'x1.5') аномалий высоты ζ , покрывающий всю область с граничными параллелями и меридианами, представленными на Рис.2, для последующего интерполирования высот квазигеоида $\zeta = Z(X, Y)$ лишь на основе формулы (5).

Для состоятельности разнообразных численных сравнений контроль результатов выполнялся лишь путем сравнения измеренных и интерполированных высот квазигеоида. Такая проверка была сделана, в

первую очередь, для 30 случайным образом выбранных точек, которые были приняты за контрольные, поскольку не использовались при построении решения MOLDGEO2004A. Рис.5 иллюстрирует результаты сравнения высот квазигеоида (полученных из GPS-нивелирования) в этих 30 независимых точках с решением MOLDGEO2004A. Здесь следует сразу же отметить малые величины полученных статистик: среднее уклонение составляет величину = 0.8 см, а стандартное уклонение = 2.6 см. Учитывая это обстоятельство, подобный тестирование измеренных и интерполированных высот квазигеоида было выполнено для всего набора использованных 1200 пунктов GPS-нивелирования, что привело к следующим статистикам: среднее уклонение составляет теперь величину = -0.2 см, а стандартное уклонение = 6.9 см. При этом остается от 30 до 50 "сомнительных пунктов", браковка которых приводит к стандартному уклонению от 6 см до 5 см.

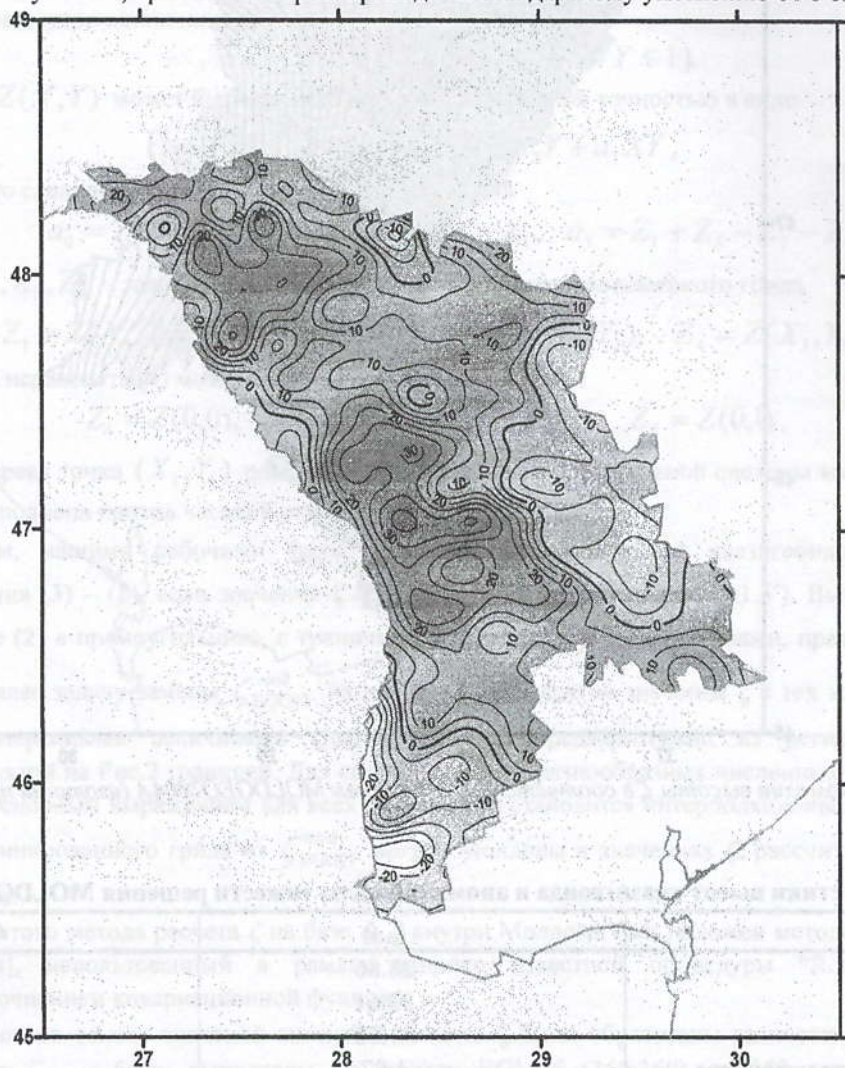


Рис.4. Аномалии силы тяжести Δg в соответствии с решением MOLDGEO2004A (изолинии проведены через 5мГал)

Несмотря на предварительный характер данной работы, позволившей, тем не менее, не только уточнить ряд локальных особенностей аномалий высоты и аномалий силы тяжести в регионе Молдовы, но и разрешить поставленную задачу построения высот квазигеоида с точностью < 1 дм, становится теперь очевидной как целесообразность, так и необходимость дополнительной проверки ряда исходных пунктов GPS-нивелирования с целью повышения точности модели квазигеоида до величины ~ 5 см. Указанная точность – с учетом ошибок определения геодезической высоты методами GPS – по-видимому, является предельной для рассмотренного региона в случае использования явно преобладающего числа пунктов геометрического нивелирования IV класса. Проверку последнего предполагается выполнить на основе не только увеличения количества исходных пунктов в следствие продолжения работ по сгущению Национальной геодезической сети Молдавии, но и использования более строгих критериев их браковки и учета точности ошибок определения геодезической и нормальной высот.

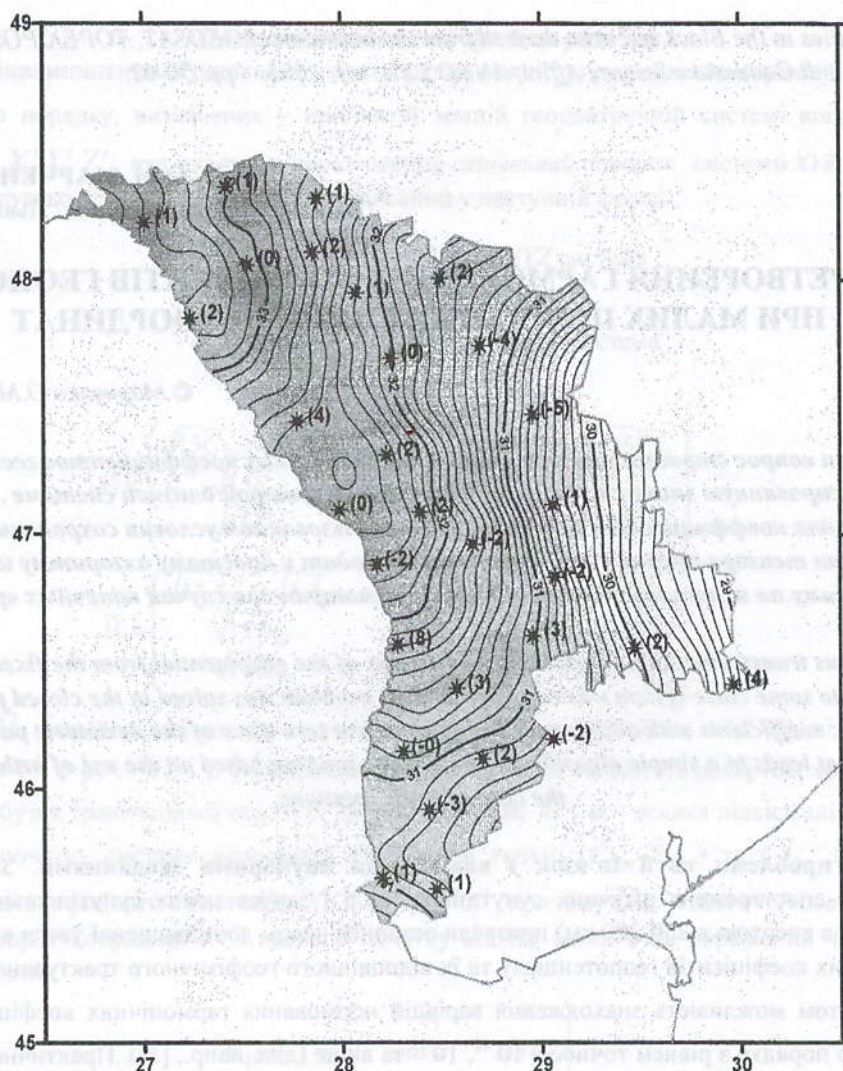


Рис. 5. Результаты сравнения измеренных и интерполированных аномалий высоты [разности даны в см] в 30 контрольных (независимых) точках

1. Марченко А., Монин И. Построение высот квазигеоида на регион Республики Молдова: предварительное решение MOLDGEO2003 // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. Наук. пр. – Л., 2004. – С. 20-26.
2. Моритц Г. Современная физическая геодезия // Пер. с англ. – М., Недра, 1983. – 600 с.
3. Denker, H. and W. Torge, The European Gravimetric Quasigeoid EGG97 – An IAG supported continental enterprise // IAG Symposium "Geodesy on the Move – Gravity Geoid, Geodynamics, and Antarctica". Proceedings, Vol. 119, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1997. – pp. 249-254.
4. Ihde J., Adam J., Gurtner W., Harsson B.G., Sacher M., Schlüter W., Wöppelmann G. The Height Solution of the European Vertical Reference Network (EUVN) // Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Astronomisch-Geodatische Arbeiten, München, Heft Nr. 61 (IAG/EUREF Publication No. 9, Ed. by J.A. Torres and H. Hornik), 2000. – pp. 132-145.
5. Jäger R. Private communication (Jäger, R., Kälber, S., Seiler, S. and S. Schneid, Precise Vertical Reference Surface Representation and Precise Transformation of Classical Networks to ETRS89 / ITRF - General Concepts and Realisation of Databases for GIS, GNSS and Navigation Applications in and outside Europe // Proceedings GNSS2003 – The European Navigation Conference, Graz, April 22-25, 2003. – CD-ROM Publication. – The Austrian Institute of Navigation, Graz).
6. Jäger R. and S. Kälber, Precise Vertical Reference Surface Representation and Precise Transformation of Classical Networks to ETRS89/ITRF - General Concepts and Realisation of Databases for GIS, GNSS and Navigation Applications in and outside Europe // Proceedings of 2nd Common Baltic Symposium, Riga, June 12 - 13, 2003.
7. W. A. Heiskanen, and Moritz, H. Physical Geodesy // W.H. Freeman, San Francisco, 1967. – 364 с.
8. Marchenko A.N. and Tartachynska

Z.R. Gravity anomalies in the Black sea area derived from the inversion of GEOSAT, TOPEX/POSEIDON and ERS-2 altimetry // Bolletino di Geodesia e Scienze Affini, ANNO LXII, n.1, 2003. – pp. 50-62.