

УДК 528.344:629.783

ФОРМИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ВЫСОТ ГЕОИДА НА ТЕРРИТОРИЮ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Николай Кириллович Шендрик

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, заведующий лабораторией кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)739-55-17, e-mail: snk_aig@mail.ru

Для территории Новосибирской области выполнено формирование и исследование трех вариантов локальных цифровых моделей геоида с регулярной сеткой по широте и долготе в системе координат WGS-84. Формирование локальных моделей осуществлялось с помощью программного обеспечения «Trimble Business Center» (ПО ТБС) и глобальной модели EGM2008-2,5'. Для вычисления высоты геоида в произвольных точках использован способ средневзвешенных значений от шести узлов на двух ближних к определяемой точке параллелях регулярной сетки. В качестве рабочей выбрана локальная модель геоида с шагом 0,012 5° (~1,4 км). Показано, что точность рабочей модели геоида и вычисления высот геоида способом средневзвешенных значений практически эквивалентны точности исходной модели EGM2008-2,5'. Средняя квадратическая погрешность отклонений от эталонных значений высот геоида для 160 контрольных точек, равномерно расположенных по территории Новосибирской области, составили ± 2 мм.

Ключевые слова: глобальная модель геоида EGM2008-2,5', локальная модель геоида, регулярная сетка, шаг регулярной сетки, высота геоида, способ средневзвешенных значений, Новосибирская область.

Создание высокоточной высотной основы является актуальной научно-практической задачей геодезии. На современном этапе предпринимаются попытки создания и совершенствования новых технологий по обеспечению высотной основой территорий с помощью спутниковых методов и использования глобальных (общеземных) моделей геоида. Одной из таких моделей геоида является EGM2008 [1–6] с регулярной сеткой на поверхности Земли с дискретностью 2,5' угловых минуты по широте и долготе. Данную модель рекомендуется использовать при обработке спутниковых измерений с целью повышения точности передачи высот. Ранее нами были выполнены исследования с подключением модели EGM2008-2,5' при обработке спутниковой геодезической сети первой очереди постоянно действующих базовых станций Новосибирской области (ПДБС НСО) в программном обеспечении «Trimble Business Center» (ПО ТБС). Результаты показали, что средняя квадратическая погрешность (СКП) передачи нормальных высот спутниковым методом, с учетом систематической составляющей между нормальной и ортометрической высотами, составила $\pm 3-4$ см на расстояниях до 350 км [3–5].

В ряде случаев целесообразно иметь локальную цифровую модель высот геоида в известном для пользователя формате, например, для проведения исследований с помощью собственных алгоритмических программ, а также контроля определений нормальных высот в производственной деятельности.

Целью данной статьи является рассмотрение методики формирования с заданной дискретностью локальной цифровой модели геоида EGM2008-2,5' и вычисление высот геоида относительно эллипсоида WGS-84 в произвольных точках на примере Новосибирской области.

Формирование локальной цифровой модели геоида может быть осуществлено в пять этапов с помощью ПО ТВС:

1) создание файла с заданной пользователем регулярной сеткой по широте и долготе на поверхности эллипсоида WGS-84 в границах локальной территории;

2) импорт созданного в пункте 1 файла в ПО ТВС в геодезическую систему координат WGS-84;

3) переход в проекцию Гаусса – Крюгера на эллипсоиде пользователя с осевым меридианом для данной локальной территории;

4) экспорт массива точек из проекции Гаусса – Крюгера в формате B, L, H , где B и L – геодезические широты и долготы в системе WGS-84, H – ортометрические высоты для заданного массива точек на поверхности эллипсоида WGS-84, которые по величине будут совпадать с значениями высот геоида, но иметь противоположный знак;

5) сортировка файла экспорта по B и L (после экспортирования из ПО ТВС файл данных выдается неупорядоченным).

В результате будет сформирована локальная выборка высот геоида из глобальной модели на заданную территорию, ограниченную начальной и конечной значениями широт и долгот с регулярной сеткой заданной дискретности. После формирования локальной модели высот геоида она является самостоятельным продуктом для пользователей. В таблице в качестве примера представлена структура файла локальной цифровой модели высот геоида с дискретностью 1° . В первой строке (шапке файла) указаны через тире начальные и конечные значения в градусах для параллелей и меридианов, ограничивающих локальную территорию, дискретность (шаг) регулярной сетки в градусах и название исходной модели высот геоида. В последующих строках файла в трех столбцах расположены, соответственно, значения широт, долгот и высот геоида, которые отсортированы по широте и долготе.

Структура файла локальной цифровой модели высот геоида

53,0-58,0	75,0-86,0	1,00 EGM2008
53,00000000	75,00000000	-34,991
53,00000000	76,00000000	-36,645
- " -	- " -	- " -
53,00000000	86,00000000	-41,021
54,00000000	75,00000000	-34,090
54,00000000	76,00000000	-35,583
- " -	- " -	- " -
58,00000000	85,00000000	-35,528
58,00000000	86,00000000	-35,082

По аналогии, локальную модель высот геоида (квазигеоида), можно представить также в прямоугольных системах координат (СК) в проекции Гаусса – Крюгера и других – государственных или местных СК. Для перехода от высот геоида к высотам квазигеоида необходимо учесть систематическую поправку для локальной территории, которая может быть получена в процессе создания ключа преобразования между системой координат WGS-84 и искомой прямоугольной СК с системой нормальных высот [7].

Имея локальную цифровую модель высот геоида с регулярной сеткой достаточно легко вычислить значения высот геоида в произвольных точках в пределах данной локальной области. Существует множество способов: от простой линейной интерполяции до аппроксимации поверхности в заданной окрестности [8]. Для сравнения мы остановились на вычислении среднеарифметических и средневзвешенных значений высот геоида от шести узлов регулярной сетки, расположенных по три на ближних параллелях к определяемой точке (рис. 1).

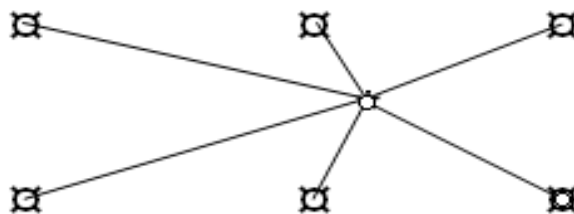


Рис. 1. Схема вычисления среднеарифметических и средневзвешенных значений высот геоида от шести узлов регулярной сетки

Для вычислений использованы формулы:

$$\zeta_a = \sum_1^6 \zeta_i / 6;$$

$$\zeta_b = \sum_1^6 [\zeta_i \cdot P_i / D_{SUM}]; \quad (1)$$

$$P_i = 1 / D_i; \quad D_i = \sqrt{(B - B_i)^2 + (L - L_i)^2}; \quad D_{SUM} = \sum_1^6 D_i;$$

где ζ_a, ζ_b – среднеарифметическое и средневзвешенное значения высоты геоида для определяемой точки;

ζ_i – высота геоида в i -м узле регулярной сетки;

P_i – вес для i -го узла;

D_i – расстояние от i -го узла до определяемой точки;

B, L и B_i, L_i – геодезические широты и долготы для определяемой точки и i -го узла.

На рис. 2, показаны графики разностей высот геоида для регулярной сетки с шагом $0,05^\circ$, вычисленные указанными двумя способами в сравнении с эталонными значениями, полученными в ПО ТВС, для 31 пункта ПДБС НСО.

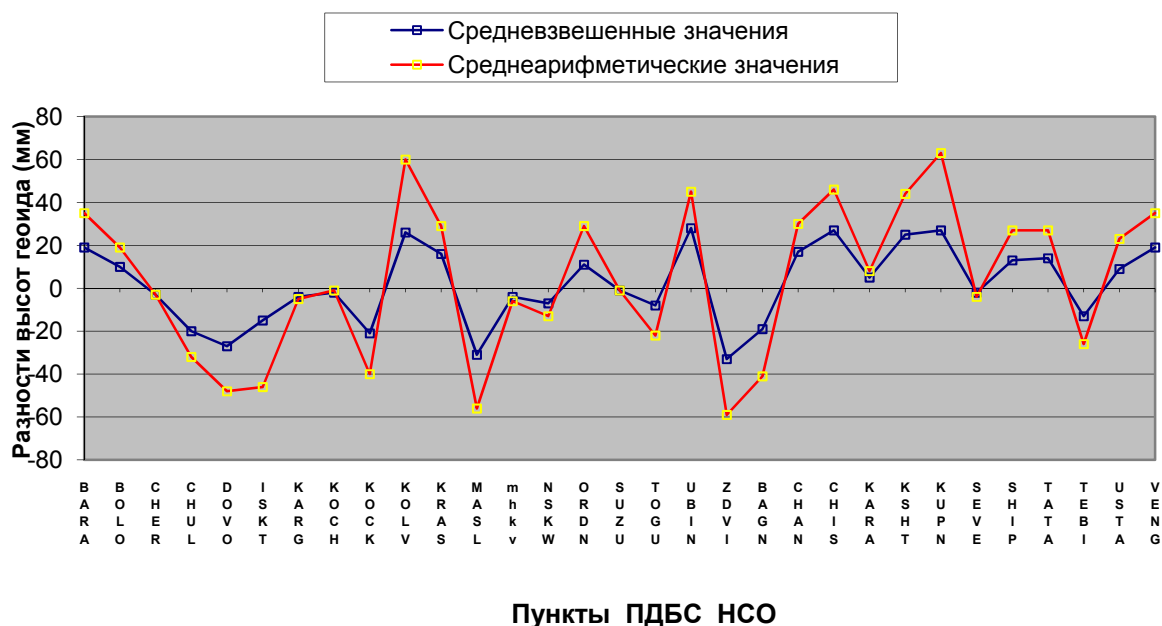


Рис. 2. Разности высот геоида между вычисленными и эталонными значениями средневзвешенным и среднеарифметическим способом в пунктах ПДБС НСО для регулярной сетки с шагом $0,05^\circ$

Как можно видеть из рис. 2, более точным является способ вычисления средневзвешенных значений с амплитудой максимальных отклонений от эталонных порядка ± 30 мм и СКП ± 18 мм, что статистически в два раза точнее среднеарифметического способа (± 60 мм и СКП ± 35 мм).

Затем были проведены исследования влияния величины дискретности (шага) регулярной сетки локальной модели на точность вычисления высот геоида способом средневзвешенных значений. Для этого были сгенерированы 160 контрольных точек в виде регулярной сетки по B и L с шагом $0,5^\circ$, линии которых были систематически сдвинуты на $0,012^\circ$ по отношению к линиям сетки локальных моделей высот геоида. Таким образом контрольные точки располагались равномерно по всей площади территории и почти в центре ячеек через 2 шага сетки с дискретностью $0,025^\circ$ и в левом нижнем секторе каждой из ячеек для локальной модели с шагом $0,05^\circ$. В контрольных точках были вычислены высоты геоида по способу средневзвешенных значений, а с помощью ПО ТВС в них же были определены эталонные значения. Разности высот геоида, вычис-

ленные для обоих вариантов локальных моделей, и эталонные значения приведены на рис. 3. Максимальная амплитуда разностей для локальной модели с шагом $0,05^\circ$ примерно на 30 % больше, чем у модели с шагом $0,025^\circ$ (± 44 мм и ± 32 мм), а СКП составили, соответственно, ± 10 мм и ± 7 мм. Для обоих вариантов локальных моделей с шагом $0,025$ и $0,05^\circ$ наблюдаются хорошо выраженные систематические смещения разностей на величину -19 мм и -7 мм, соответственно.

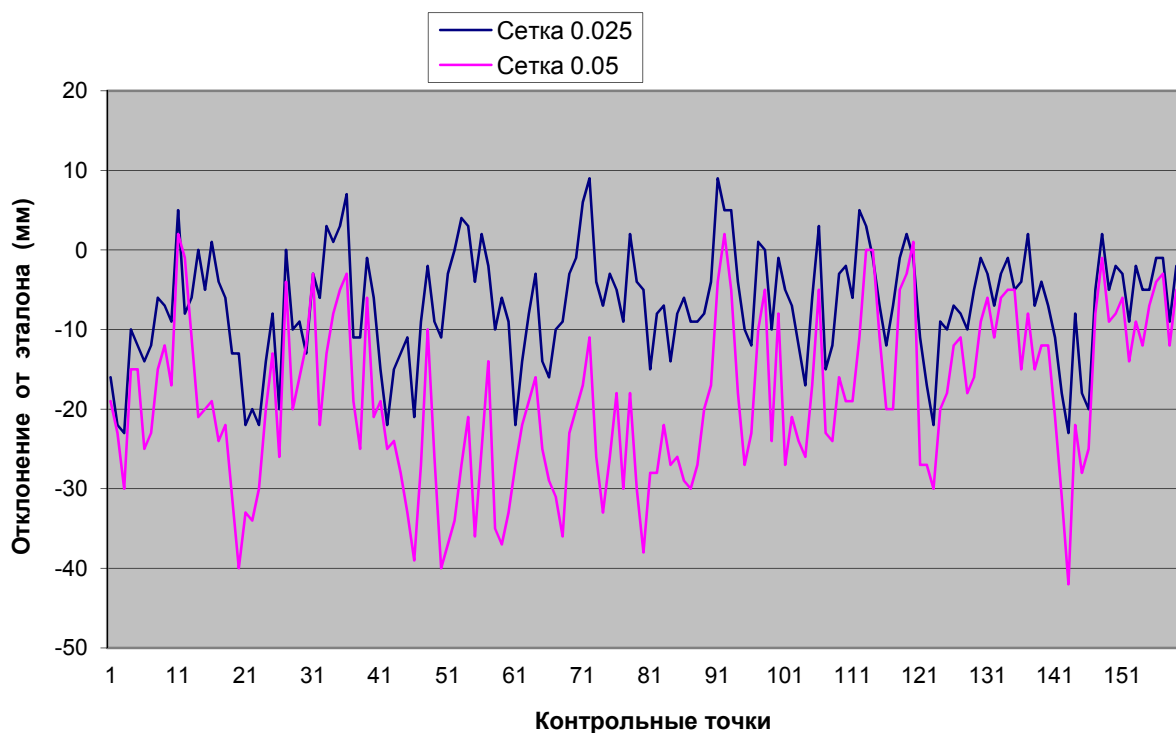


Рис. 3. Разности вычисленных и эталонных высот геоида в контрольных точках для локальных моделей с шагом $0,025$ и $0,05^\circ$

В качестве окончательного варианта локальной цифровой модели высот геоида на территорию Новосибирской области принята модель с регулярной сеткой по B и L с шагом $0,0125^\circ$ ($\sim 1,4$ км). Разности высот геоида, вычисленные для локальной модели с шагом сетки $0,0125^\circ$, и эталонных значений в контрольных точках приведены на рис. 4.

Статистические характеристики данной модели показали наилучшую из трех рассмотренных локальных моделей максимальную амплитуду отклонений от эталонных значений, равную ± 10 мм, среднее значение $+1$ мм и СКП ± 2 мм. Таким образом, данную локальную модель геоида для территории Новосибирской области можно считать практически эквивалентной по точности исходной глобальной модели EGM2008-2,5'. Пространственное графическое отображение

локальной модели геоида с шагом регулярной сетки $0,0125^\circ$ и сечением рельефа 1 м на территорию Новосибирской области показано на рис. 5.

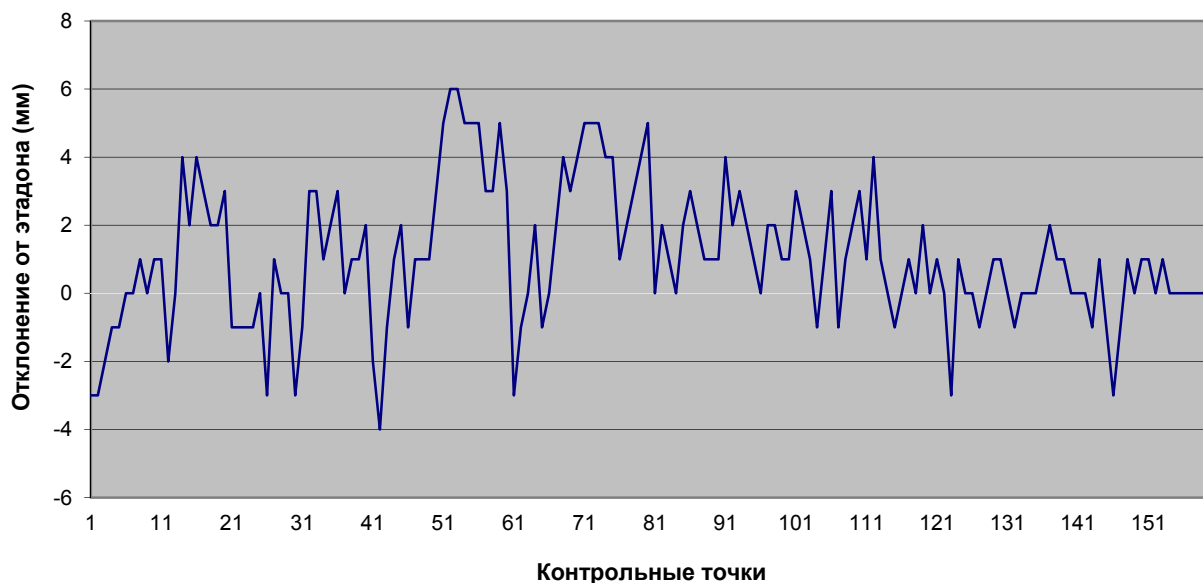


Рис. 4. Разности вычисленных и эталонных высот геоида в контрольных точках для локальной модели с шагом $0,0125^\circ$

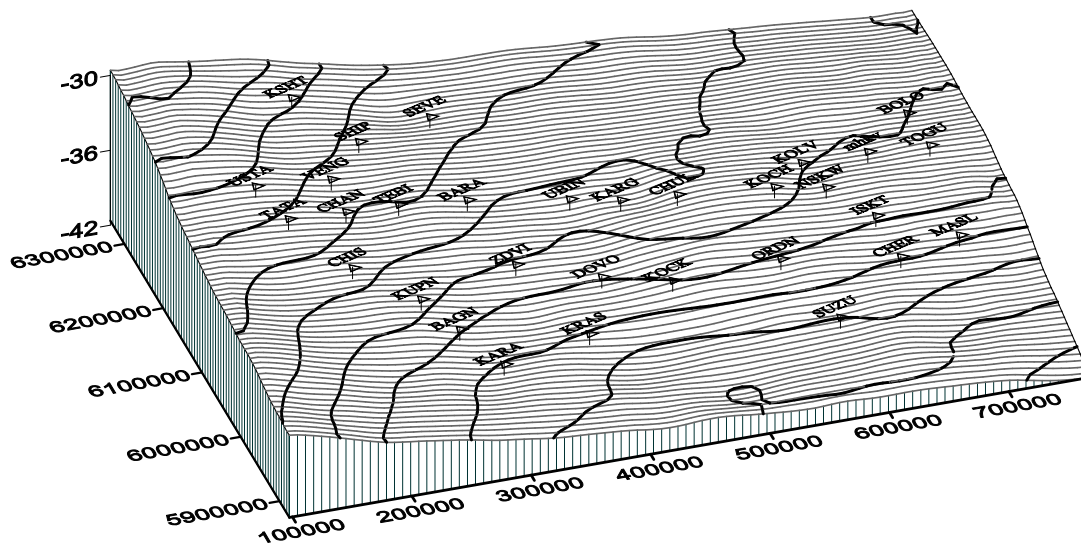


Рис. 5. Поверхность локальной модели геоида EGM2008 с шагом регулярной сетки $0,0125^\circ$ и сечением рельефа 1 метр на Новосибирскую область

Дополнительно на рисунке отмечены положения пунктов ПДБС НСО. Пространственное построение выполнено с помощью ПО Surfer [8] в системе плоских прямоугольных координат для 14-й шестиградусной зоны в проекции

Гаусса – Крюгера на эллипсоиде Красовского. Переход от сетки геодезических координат в WGS-84 к прямоугольным координатам в проекции Гаусса – Крюгера осуществлен путем пространственного преобразования по методу Гельмерта.

В заключение отметим, что на примере Новосибирской области и глобальной модели EGM2008 отработана методика формирования и выбор наиболее оптимального по точности варианта локальной цифровой модели и алгоритма вычисления высот геоида в произвольных точках по результатам спутниковых определений широт и долгот в общеземной системе координат WGS-84. Предполагается, что полученные результаты в дальнейшем могут использоваться для вычисления нормальных высот пунктов для произвольных общеземных и референц-эллипсоидов по формуле вида:

$$h = H - \zeta + \Delta, \quad (2)$$

где h , H – нормальная и геодезическая высоты, соответственно;

ζ – высота геоида;

Δ – систематическая составляющая разностей между нормальными и ортометрическими высотами для локальной территории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гиенко Е. Г., Решетов А. П., Струков А. А. Исследование точности получения нормальных высот и уклонов отвесной линии на территории Новосибирской области с помощью глобальной модели геоида EGM2008 // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 2. – С. 164–168.
2. Обиденко В. И., Оприцова О. А., Решетов А. П. Разработка методики получения нормальных высот на территорию Новосибирской области с использованием глобальной модели EGM2008 // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 14–25.
3. Шендрик Н. К. К точности положений пунктов ПДБС Новосибирской области в государственной системе координат и высот // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 21–27.
4. Шендрик Н. К. Исследование точности геодезической сети активных базовых станций Новосибирской области в государственной системе координат и высот // Геодезия и картография. – 2014. – № 1. – С. 2–7.
5. Шендрик Н. К. Способ итераций для высокоточной реконструкции координат пунктов локальных геодезических сетей // Геопрофи. – 2014. – № 5. – С. 44–48.
6. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли : монография / В. Ф. Канушин, А. П. Карпик, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Н. С. Косарев, А. М. Косарева. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 270с.
7. Шендрик Н. К. Методика выноса проектных точек на местность в WGS-84 // Геопрофи. – 2016. – № 5. – С. 44–46.
8. Силкин К. Ю. Геоинформационная система Golden Software Surfer 8 : учеб.-метод. пособие для вузов. – Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008. – 65 с.

Получено 27.10.2016

© Н. К. Шендрик, 2016

CREATING A LOCAL DIGITAL MODEL OF GEOID HEIGHT IN THE NOVOSIBIRSK REGION

Nikolai K. Shendrik

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Head of the Laboratory of the Department of Physical Geodesy and Remote Sensing, tel. (913)739-55-17, e-mail: snk_aig@mail.ru

For the territory of the Novosibirsk region holds the formation and study of the three options of local digital geoid models with a regular grid of latitude and longitude in WGS-84 coordinate system. Formation of local models was carried out using the software «Trimble Bussines Center» (ON TBC) and a global model EGM2008-2,5'. To compute the geoid height at arbitrary points used method of weighted averages of the six units at the two closest to the defined point parallels the regular grid. As a working model of the geoid selected local increments $0,0125^\circ$ (~ 1,4 km). It is shown that the accuracy of the working model of the geoid and the geoid height calculation method is almost equivalent to the weighted average values of precision of the original model EGM2008-2,5'. Average kvadrnicheskaya error deviations from the reference geoid height values for 160 test points, evenly spaced around the territory of the Novosibirsk region amounted to $\pm 2\text{mm}$.

Key words: global geoid model EGM2008-2,5', a local geoid model, regular grid, step-regular grid, the height of the geoid, the method of weighted averages, Novosibirsk region.

REFERENCES

1. Gienko, E. G, Rechetov, A. P, & Strukov, A. A. (2011). Research of normal height and vertical deviation determination accuracy on Novosibirsk region territory by the global model of geoid EGM2008. In *Sbornik materialov GEO-Sibir-2011: T. 1, ch. 2. [Proceedings of GEO-Siberia-2011: Vol. 1, Part. 1]* (pp. 181–186). Novosibirsk: SGGGA [in Russian]
2. Obidenko, V. I., Opritova, O. A., & Reshetov, A. P. (2016). Working out a technique of reception of normal heights in territory of the Novosibirsk region with use of earth gravitational model EGM2008. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 14–25 [in Russian].
3. Shendrik, N. K. (2013). For accuracy paragraphs PDBS Novosibirsk region in the state system of coordinates and altitudes. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoi konferentsii: T. 3. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 3. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Vine Surveying]* (pp. 21–27). Novosibirsk: SSGA [in Russian].
4. Shendrik, N. K. (2014). The investigation of precision geodetic network of active base stations Novosibirsk region in the state system of coordinates and altitudes. *Geodeziya i Kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 5, 2–7 [in Russian].
5. Shendrik, N. K. (2014). The method of iterations for precise reconstruction coordinates of points of local geodetic networks. *Geoprofi [Geoprofi]*, 5, 44–48 [in Russian].
6. Kanushin, V. F., Karpik, A. P., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Kosarev, N. S., & Kosareva, A. M. (2015). *Issledovanie sovremennykh global'nykh modeley gravitatsionnogo polya Zemli [Study of the current global model of the gravitational field of the Earth]*. Novosibirsk: SGUGT [in Russian].
7. Shendrik, N. K. (2016). Methods of removal of design points on the terrain in the WGS-84. *Geoprofi [Geoprofi]*, 5, 44–46 [in Russian].
8. Silkin, K. Y. (2008). *Geoinformatsionnaya sistema Golden Softwfre Surfer 8 [Geographic Information System Golden Softwfre Surfer 8]*. Voronezh State University [in Russian].

Received 27.10.2016

© N. K. Shendrik, 2016