

СТАТЬИ

УДК 528.21(620)

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ЛОКАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕОИДА
ДЛЯ ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЕГИПТА****Баранов В.Н., Елшеви М.А., Эль Мокдад Б.Р., Фунг Ч.Т.***Государственный университет по землеустройству, Москва, e-mail: mimoelshewy@gmail.com*

Технологии глобальных навигационных спутниковых систем (далее – ГНСС) играют значительную роль в современном мире. ГНСС обеспечивают геодезическую высоту, высоту над эллипсоидом, тогда как в инженерной практике обычно используются ортометрические высоты. Таким образом, важно преобразовать геодезические высоты в ортометрические высоты с помощью точной модели геоида. В этом исследовании для создания локальной модели геоида была предпринята попытка использования методов полиномиальной регрессии и искусственной нейронной сети (далее – ИНС) на прибрежных территориях Средиземного и Красного морей. Кроме того, в исследуемых областях оценивалась точность нескольких глобальных моделей гравитационного потенциала Земли (далее – ГПЗ), особенно EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1 и XGM2019e_2159. 87 опорных точек (с данными спутникового нивелирования) для побережья Средиземного моря и 75 для побережья Красного моря использовались для создания локальных моделей геоида и оценки точности ГПЗ. Точность локальных моделей геоида, полученных на прибрежных территориях Средиземного и Красного морей с использованием ИНС, с погрешностью не более $\pm 0,03$ м и $\pm 0,04$ м соответственно. Эти модели использовались для оценки ГПЗ в исследуемых областях. Результаты показывают, что XGM2019e_2159 представляет наиболее точную ГПЗ на прибрежной территории Средиземного моря с погрешностью не более $\pm 0,14$ м. В то время как GECO представляет наиболее точную ГПЗ модели на прибрежной территории Красного моря с погрешностью не более $\pm 0,26$ м. Рекомендуется учитывать новые методы мягких вычислений, такие как ИНС, в процессе разработки точной национальной модели египетского геоида.

Ключевые слова: ГНСС/нивелирование, искусственная нейронная сеть, полиномиальная регрессия, локальная модель геоида

**RESEARCH ON CREATING LOCAL GEOID MODELS FOR THE COASTAL
TERRITORIES OF EGYPT****Baranov V.N., Elshevi M.A., El Mokdad B.R., Fung T.T.***State University of Land Use Planning, Moscow, e-mail: mimoelshewy@gmail.com*

Global navigation satellite systems (GNSS) technologies play a significant role in the modern world. The main dilemma in GNSS surveying is the ellipsoidal based heights type, whereas in engineering practice usually orthometric heights are used. Thus, it is important to convert GNSS heights into orthometric heights by applying an accurate geoid model. In this study, to create a local geoid model an attempt was made using polynomial regression and Artificial Neural Network (ANN) techniques on the coastal areas of the Mediterranean and Red Seas. Also, the accuracy of several Global Geopotential Models (GGMs) especially EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, and XGM2019e_2159 was evaluated in the study areas. 87 GNSS /leveling data reference points for the Mediterranean coast and 75 for the Red Sea coast were used to create the local geoid models and to evaluate the accuracy of the GGMs. The accuracy of local geoid models obtained in the coastal territories of the Mediterranean and Red Seas using the ANN was with an error of no more than ± 0.03 m and ± 0.04 m, respectively. These models were used to evaluate the GGMs in the study areas. The results show that XGM2019e_2159 represents the most accurate global geopotential model on the coastal areas of the Mediterranean with an error of no more than ± 0.14 m. While GECO represents the most accurate global geopotential model on the coastal areas of the Red Sea with an error of no more than ± 0.26 m. It is recommended that the new soft computing techniques such as ANN should be considered in the undergoing development of an accurate national Egyptian geoid model.

Keywords: GNSS/levelling, Artificial Neural Network, polynomial regression, local geoid model

В последнее время одним из наиболее часто используемых методов практической геодезии являются ГНСС. ГНСС обеспечивают трехмерную фиксацию, по которой получается высота над эллипсоидом. Геодезические высоты – чисто математические, не имеющие физического смысла. В инженерных работах используются ортометрические высоты, т.е. высоты над геоидом. Чтобы в полной мере использовать потенциал ГНСС, необходимо установить взаимосвязь между геодезической высотой

и ортометрической высотой посредством моделирования геоида. Связь между геодезической высотой (H), ортометрической высотой (H^g) и высотой геоида (ζ) задается уравнением (1), рис. 1. В Египте многие исследования в последние годы были сосредоточены на определении модели геоида для всей территории или для некоторых важных областей, например [1, 2]. Даже сейчас точное моделирование геоида остается актуальной задачей.

$$H^g = H - \zeta, \quad (1)$$

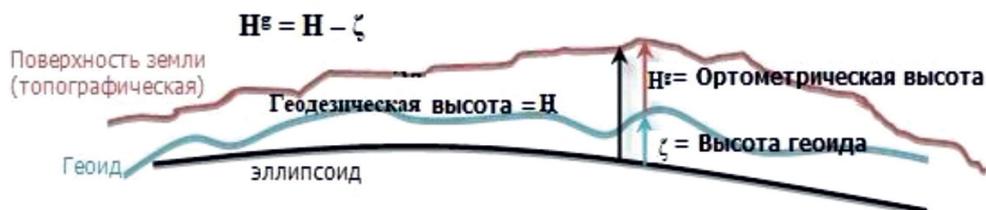


Рис. 1. Связь между высотами геодезической, ортометрической и геоида

Данные ГНСС/нивелирования обычно используются для определения высоты геоида ($\zeta_{\text{ГНСС/Нив}}$) в опорных точках и для оценки высоты геоида от ГПЗ ($\zeta_{\text{ГПЗ}}$) в этих точках [3]. Например, существует ряд исследований, посвященных изучению производительности ГПЗ [4, 5]. Для определения геоида можно использовать спутниковое нивелирование метода. Полиномиальные модели являются одной из популярных и широко используемых математических моделей. Общая форма полиномиальной модели: $\zeta(\varphi, \lambda) = a_1\varphi^n + a_2\lambda^n + \dots$. Например, полином второй степени:

$$\zeta(\varphi, \lambda) = a_1\varphi^2 + a_2\lambda^2 + a_3\varphi\lambda + a_4\varphi + a_5\lambda + a_6, \quad (2)$$

где от a_1 до a_6 – шесть коэффициентов преобразования.

Недавно ИНС стала одним из новых методов разработки моделирования геоида, рис. 2. Elshambaky подтвердил, что многослойная нейронная сеть с прямой связью с двумя нейронами является наиболее точной из исследованных методик преобразования [6]. Albuayrak сообщил, что модель геоида, идентифицированная с помощью ИНС, кажется более надежной по сравнению с моделью, рассчитанной с использованием традиционных методов интерполяции [7].

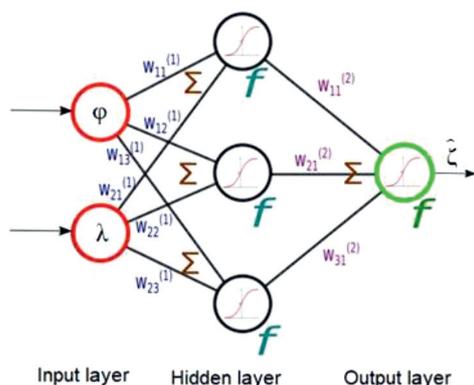


Рис. 2. Схематическое изображение ИНС

В связи с вышесказанным целью данного исследования является создание локальных моделей геоида в прибрежных территориях Средиземного и Красного морей с использованием ГНСС/нивелирования данных от 162 опорных точек, а затем использование этих моделей для оценки точности глобальных моделей геоида, EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1 и XGM2019e_2159 в исследуемых областях.

Материалы и методы исследования

Область исследования и измерения

Область исследования охватывает большинство морских побережий Египта, граничащего со Средиземным и Красным морями. Побережье Средиземного моря простирается примерно на 700 км от Сиди Баррани (31°29'14.94"N, 26°36'18.80"E) до побережья Северной Синай (31°2'49.11"N, 33°0'21.81"E). Побережье Красного моря простирается примерно на 800 км от Суэца через Хургаду (29°47'22.98"N, 32°26'24.40"E) до Халаеба и Шалатина (24°12'25.52"N, 35°25'51.29"E). На рис. 3 показан план изучаемых территорий. Район исследования на прибрежной территории Средиземного моря включал 87 реперов, а район исследования на прибрежной территории Красного моря – 75 реперов. Точные данные нивелирования были собраны с помощью точного нивелира Leica NA2 путем привязки петель нивелирования первого порядка к национальной вертикальной системе координат Египта. Погрешность ортометрических высот составляет не более $\pm 1,0$ см по отношению к ближайшим точкам государственной сети нивелирования. Кроме того, измерения GNSS для 162 реперов были выполнены относительно национальной геодезической системы координат Египта. Двухчастотные геодезические приемники Trimble 5700 использовались в относительном статическом режиме на базовой опорной станции в течение 2 ч

для наблюдений каждого ровера. Геодезические высоты рассчитывались для каждой станции в каждом сеансе с погрешностью не более $\pm 2-3$ см.

Методика исследования

Чтобы создать локальные модели геоида для побережья Средиземного и Красного морей, можно использовать многие методы моделирования поверхности для повышения точности модели. В этом исследовании для моделирования локальной поверхности геоида использовались методы полиномиальной регрессии и ИНС. Локальные модели геоида были созданы с использованием опорных точек (спутниковых нивелированных точек) для побережья Средиземного и Красного морей с использованием полиномиальной регрессии и ИНС. Полиномиальная регрессия и ИНС оценивались в разных вариантах. Высоты разработанного геоида рассчитывались на основе созданных локальных моделей геоида из лучших моделей. Для оценки точности высот геоида, полученных из EGM08, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1 и XGM2019e_2159, высоты геоида из этих моделей сравнивались с высотами геоида, полученными из лучших моделей. Эти шаги более подробно описаны в следующих подразделах.

Создание локальной модели геоида с помощью метода полиномиальной регрессии

Для создания локальной модели геоида методом регрессии, вначале высоты геоида опорных точек были рассчитаны с использованием уравнения (1). После этого в процессе регрессии использовались широта и долгота точек. Использовались четыре степени полиномиальной регрессии; таким образом, четыре локальные модели геоида были получены как комбинация вариантов с использованием уравнений (3)–(6).

$$\zeta(\varphi, \lambda) = a_1 \varphi + a_2 \lambda + a_3, \quad (3)$$

$$\zeta(\varphi, \lambda) = a_1 \varphi^2 + a_2 \lambda^2 + a_3 \varphi \lambda + a_4 \varphi + a_5 \lambda + a_6, \quad (4)$$

$$\zeta(\varphi, \lambda) = a_1 \varphi^3 + a_2 \lambda^3 + a_3 \varphi^2 \lambda + a_4 \varphi \lambda^2 + a_5 \varphi^2 + a_6 \lambda^2 + a_7 \varphi \lambda + a_8 \varphi + a_9 \lambda + a_{10}, \quad (5)$$

$$\zeta(\varphi, \lambda) = a_1 \varphi^4 + a_2 \lambda^4 + a_3 \varphi^2 \lambda^2 + a_4 \varphi^3 \lambda + a_5 \varphi \lambda^3 + a_6 \varphi^3 + a_7 \lambda^3 + a_8 \varphi^2 \lambda + a_9 \varphi \lambda^2 + a_{10} \varphi^2 + a_{11} \lambda^2 + a_{12} \varphi \lambda + a_{13} \varphi + a_{14} \lambda + a_{15}. \quad (6)$$

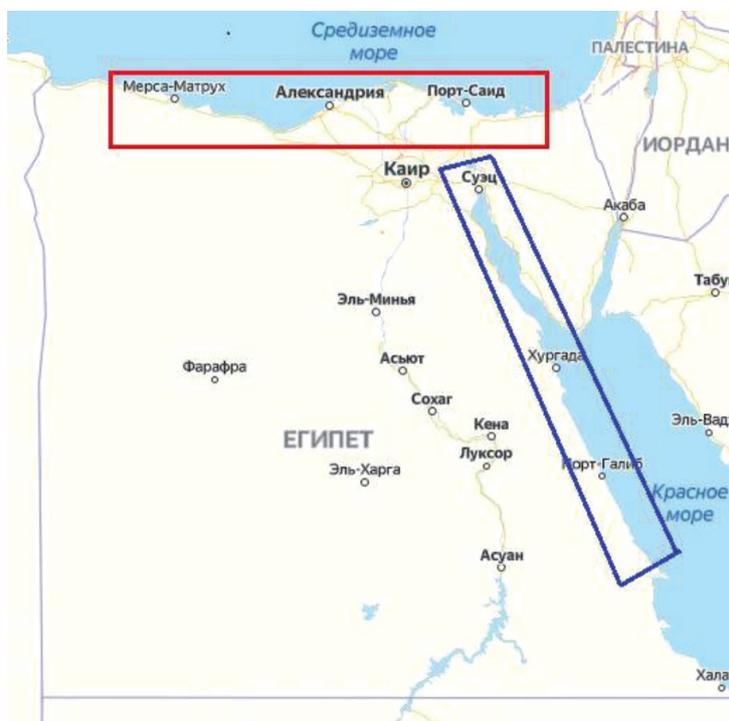


Рис. 3. Расположение зоны исследования

*Создание локальной модели геоида
с помощью ИНС*

Существуют различные модели техники ИНС, включая многослойную нейронную сеть с прямой связью, радиальную базисную сеть, сеть обобщенной регрессии и вероятностные сети. В этом исследовании для создания локальных моделей геоида был выбран вариант многослойной прямой связи, поскольку он обладает хорошими репрезентативными возможностями. Модели ИНС были созданы с использованием программного обеспечения MATLAB R2016a. В этом исследовании лучший результат был получен с двумя скрытыми слоями и десятью нейронами после тестирования нескольких различных сетевых структур. TANSIG использовался в качестве передаточной функции. Чтобы оценить точность метода ИНС для создания локальной модели геоида и в то же время для сравнения между ИНС и полиномиальной регрессией, здесь были выполнены те же 4 варианта, которые использовались с методом полиномиальной регрессии.

*Оценка ГПЗ на побережьях Средиземного
и Красного морей*

Чтобы оценить точность EGM08, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1 и XGM2019e_2159, высоты геоида ГПЗ ($\zeta_{ГПЗ}$) для опорных точек были получены из расчетной службы ICGEM [8]. После этого локальные высоты геоида, полученные из ГПЗ, сравнивались с локальными высотами геоида, полученными из ГНСС/нивелирования, с использованием уравнения

$$\Delta\zeta = \zeta_{ГПЗ} - \zeta_{л}, \quad (7)$$

где $\zeta_{л}$ – высоты геоида, полученные из лучших моделей полиномиальной регрессии или ИНС для данных ГНСС/нивелирования.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Для берегов Средиземного и Красного морей были рассчитаны фактические значения высоты геоида для всех 162 опорных точек. Затем эти высоты геоида были интерполированы с использованием методов полиномиальной регрессии и ИНС для получения поверхностей, представляющих локальные модели геоидов на этих побережьях.

*Локальные модели геоида
для побережья Средиземного моря*

Чтобы оценить точность полиномиальной регрессии и ИНС при создании локальной модели геоида на побережье Средиземного моря, были выполнены 4 локальные модели геоида с использованием ϕ и λ в 1-й, 2-й, 3-й и 4-й степенях. После этого значения $\zeta_{ГНСС/нив-пр}$ и $\zeta_{ГНСС/нив-инс}$ высоты геоида из этих моделей сравнивались с $\zeta_{ГНСС/нив}$ для тех же точек. В табл. 1 представлены полученные результаты.

Из табл. 1 видно, что лучшей локальной моделью геоида для побережья Средиземного моря была четвертая модель при использовании ϕ и λ в 4-й степени полиномиальной регрессии. Кроме того, результаты показали, что лучшей локальной моделью геоида от ИНС для побережья Средиземного моря была вторая модель при использовании ϕ и λ в 2-й степени. Во всех четырех моделях точность, полученная с помощью ИНС, была лучше, чем точность, полученная с помощью полиномиальной регрессии.

*Локальные модели геоида
для побережья Красного моря*

Здесь были выполнены те же шаги, что и при создании локального геоида на побережье Средиземного моря. В табл. 2 представлены полученные результаты.

Таблица 1

Результаты статистического анализа $\zeta_{ГНСС/нив-пр}$ и $\zeta_{ГНСС/нив-инс}$ и $\zeta_{ГНСС/нив}$ на побережье Средиземного моря

	Модели из полиномиальной регрессии				Модели из ИНС			
	1-я степень	2-я степень	3-я степень	4-я степень	1-я степень	2-я степень	3-я степень	4-я степень
Среднее (м)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	-0,001	0,001	-0,002
СКО (м)	0,507	0,209	0,082	0,060	0,045	0,032	0,061	0,035
Диапазон	2,237	1,042	0,654	0,383	0,327	0,180	0,481	0,226
Минимальное (м)	-1,154	-0,522	-0,294	-0,222	-0,070	-0,103	-0,106	-0,139
Максимальное (м)	1,083	0,520	0,360	0,161	0,257	0,078	0,375	0,087

Лучшей моделью для локального геоида на побережье Красного моря с полиномиальной регрессией была четвертая модель при использовании φ и λ в 4-й степени, это показано в табл. 2. Кроме того, результаты показали, что лучшей локальной моделью геоида от ИНС была третья модель при использовании φ и λ в 3-й степени. В четырех моделях точность, полученная с помощью ИНС, была лучше, чем точность, полученная с помощью полиномиальной регрессии.

Оценка точности высот геоида, полученных из глобальных моделей геоида

Высоты геоида EGM08, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1 и XGM2019e_2159 для всех опорных точек на побережьях Средиземного и Красного морей были получены из службы расчетов ICGEM. Затем по урав-

нению (7) были рассчитаны различия между $\zeta_{ГПЗ}$ и $\zeta_{л}$. $\Delta\zeta$ -EGM, $\Delta\zeta$ -EIG, $\Delta\zeta$ -GEC, $\Delta\zeta$ -SGG, $\Delta\zeta$ -XGM – это разница между высотами геоидов из EGM08, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1 и XGM2019e_2159 и высотами геоидов из лучших моделей соответственно. Для побережья Средиземного моря лучшим локальным геоидом была вторая модель с использованием φ и λ в 2-й степени из метода ИНС. В то время как для побережья Красного моря лучшим локальным геоидом была третья модель с использованием φ и λ в 3-й степени из метода ИНС. На рис. 4 и 5 показаны $\Delta\zeta$ -EGM, $\Delta\zeta$ -EIG, $\Delta\zeta$ -GEC, $\Delta\zeta$ -SGG, $\Delta\zeta$ -XGM на побережьях Средиземного и Красного морей соответственно.

В табл. 3 и 4 представлено сравнение между $\zeta_{ГПЗ}$ и $\zeta_{л}$ для побережья Средиземного и Красного морей соответственно.

Таблица 2

Результаты статистического анализа $\zeta_{ГНСС/нив-пр}$ и $\zeta_{ГНСС/нив-инс}$ и $\zeta_{ГНСС/нив}$ на побережье Красного моря

	Модели из полиномиальной регрессии				Модели из ИНС			
	1-я степень	2-я степень	3-я степень	4-я степень	1-я степень	2-я степень	3-я степень	4-я степень
Среднее (м)	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,006	-0,003	0,000	-0,001
СКО (м)	0,230	0,198	0,166	0,162	0,046	0,043	0,038	0,041
Диапазон	1,127	0,920	0,681	0,617	0,340	0,194	0,168	0,208
Минимальное (м)	-0,554	-0,400	-0,329	-0,314	-0,201	-0,112	-0,084	-0,094
Максимальное (м)	0,573	0,520	0,352	0,303	0,139	0,081	0,085	0,114

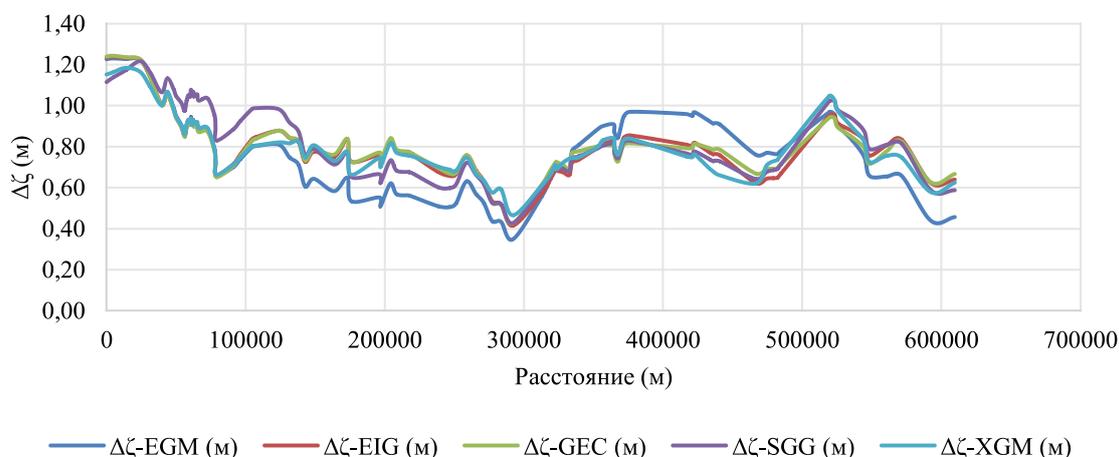


Рис. 4. Различия между высотами геоида из глобальных моделей геоида и высотами геоида из разработанной локальной модели геоида на побережье Средиземного моря

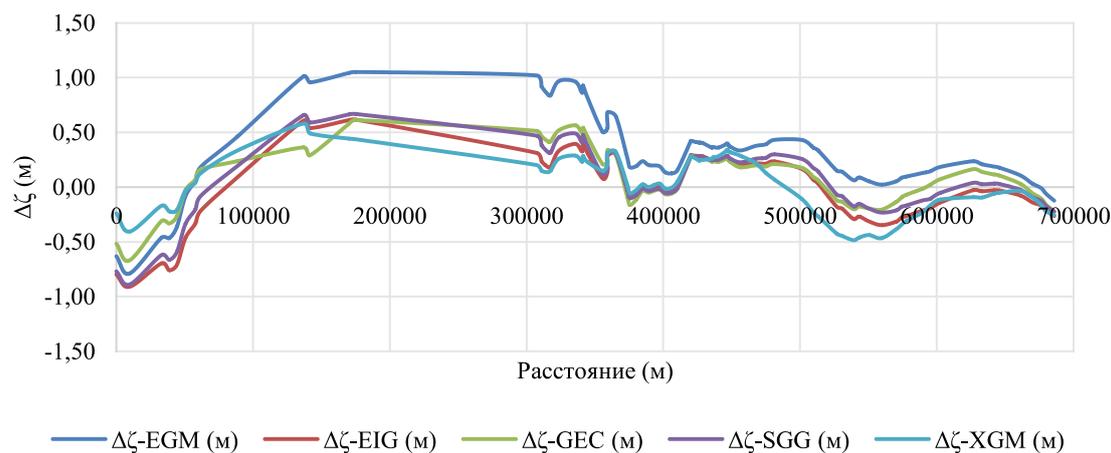


Рис. 5. Различия между высотами геоида из глобальных моделей геоида и высотами геоида из разработанной локальной модели геоида на побережье Красного моря

Таблица 3

Сравнение $\zeta_{ГПЗ}$ и $\zeta_{л}$ для побережья Средиземного моря

	EGM08	EIGEN-6C4	GECO	SGG-UGM-1	XGM2019e_2159
Среднее (м)	0,783	0,807	0,811	0,836	0,805
СКП (м)	0,197	0,150	0,144	0,178	0,138
Диапазон	0,864	0,793	0,794	0,733	0,662
Минимальное (м)	0,376	0,453	0,458	0,462	0,504
Максимальное (м)	1,240	1,246	1,252	1,195	1,166

Таблица 4

Сравнение $\zeta_{ГПЗ}$ и $\zeta_{л}$ для побережья Красного моря

	EGM08	EIGEN-6C4	GECO	SGG-UGM-1	XGM2019e_2159
Среднее (м)	0,313	0,017	0,106	0,072	0,031
СКП (м)	0,386	0,327	0,261	0,319	0,266
Диапазон	1,840	1,527	1,281	1,558	1,064
Минимальное (м)	-0,789	-0,910	-0,669	-0,890	-0,484
Максимальное (м)	1,052	0,617	0,612	0,668	0,580

Из табл. 3 видно, что на побережье Средиземного моря точность пяти моделей была близка друг к другу, но с небольшим преимуществом для XGM2019e_2159. Из табл. 4 видно, что на побережье Красного моря наблюдалось заметное превосходство точности GECO над остальными моделями.

Заключение

В последние годы одной из интересных и сложных задач в области геодезической съемки является точное определение ортометрических высот по данным ГНСС

измерений. Таким образом, это исследование было предпринято для определения подходящих локальных моделей геоида для геодезических приложений на побережьях Египта. Для этого были использованы методы полиномиальной регрессии и ИНС для моделирования локальной поверхности геоида. Кроме того, была проведена оценка точности некоторых ГПЗ на побережьях Средиземного и Красного морей. Основываясь на предыдущем анализе и полученных численных результатах, точность определения локальной модели геоида на прибрежных территориях Сре-

диземного и Красного морей с использованием ИНС было с погрешностью не более $\pm 0,03$ м и $\pm 0,04$ м соответственно. Что касается оценки ГПЗ, полученные результаты показывают, XGM2019e_2159 и GECO представляют собой самые точные из ГПЗ на прибрежных территориях Средиземного и Красного морей с погрешностью не более $\pm 0,14$ м и $\pm 0,26$ м соответственно.

Список литературы / References

1. El-Ashquer M.A. An improved hybrid local geoid model for Egypt, Doctoral dissertation, Zagazig University, 2017. 170 p.
2. Dawod G.M., Abdel-Aziz T.M. Utilization of geographically weighted regression for geoid modelling in Egypt. *Journal of Applied Geodesy*. 2020. № 14(1). P. 1–12.
3. Erol B., Işık M.S., Erol S. An Assessment of the GOCE High-Level Processing Facility (HPF) Released Global Geopotential Models with Regional Test Results in Turkey. *Remote Sensing*. 2020 Jan. № 12 (3). P. 586.
4. Канушин В.Ф., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н., Мазурова Е.М., Косарев Н.С., Косарева А.М. Современные глобальные модели квазигеоида: точностные характеристики и разрешающая способность // *Вестн. СГУГиТ*. 2017. Т. 22. № 1. С. 30–49.
5. Kanushin V.F., Ganagina I.G., Goldobin D.N., Mazurova E.M., Kosarev N.S., Kosareva A.M. New global models of quasi-geoids: characteristic of accuracy and resolution // *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*. 2017. 22 (1). P. 30–49 (in Russian).
5. Ака Блаш Ульфред. О создании предварительной модели геоида на территорию Республики Кот д'Ивуар // *Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2019. Т. 63. № 2. С. 134–144. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-2-134-144.
6. Aka Blash Ulfred. On the creation of a preliminary geoid model for the territory of the Republic Côte d'Ivoire // *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka»*. 2019. 63 (2). P. 134–144 (in Russian).
6. Elshambaky H.T. Application of neural network technique to determine a corrector surface for global geopotential model using GPS/levelling measurements in Egypt. *Journal of applied geodesy*. 2018 Jan 26. № 12 (1). P. 29–43.
7. Albayrak M., Özlüdemir M.T., Aref M.M., Halicioğlu K. Determination of Istanbul geoid using GNSS/levelling and valley cross levelling data. *Geodesy and Geodynamics*. 2020 Mar 19. P. 163–173.
8. ICGEM, International Centre for Global Earth Models (ICGEM). [Electronic resource]. URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpnts> (date of access: 25.12.2020).