

## ГЕОДЕЗИЯ

DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-3-249-258

### Моделирование неприливых вариаций гравитационного поля с использованием корреляционной модели прогноза

© 2020 г. К.И. Маркович

Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь  
markovich.kirill@mail.ru

### Modeling non-tidal variations of the gravitational field using prediction correlation model

K.I. Markovich

Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus  
markovich.kirill@mail.ru

Received January 30, 2020

Revised Mars 18, 2020

Accepted June 1, 2020

**Keywords:** gravity acceleration variations, modern vertical movements of the earth's crust, tectonic zoning, regression equations, Vogler effect.

**Summary.** The article presents studies related to assessing the possibility of using the axiomatic correlation model for predicting non-tidal variations in the gravitational field. The presented method of mathematical modeling has been tested for the territory of the Republic of Belarus using the velocity map of modern vertical movements of the earth's crust, which is constructed using a complex of geodetic, geological, geophysical, and seismological data. The research results showed that the use of a correlation model for predicting non-tidal variations in the gravitational field by the speeds of modern vertical movements of the earth's crust is very promising. This method helps to increase the reliability of maps of gravitational field variations in territories poorly provided with repeated gravimetric measurements and consisting of different age and different type geostructural elements.

**Citation:** Markovich K.I. Modeling non-tidal variations of the gravitational field using prediction correlation model. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying»*. 2020, 64 (3): 249–258. [In Russian]. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-249-258.

Поступила 30 января 2020 г.

После доработки 18 марта 2020 г.

Принята к печати 1 июня 2020 г.

**Ключевые слова:** вариации ускорения силы тяжести, корреляционная модель прогноза, современные вертикальные движения земной коры, тектоническое районирование, уравнения регрессии, эффект Фоглера.

Представлены исследования, связанные с оценкой возможности применения аксиоматической корреляционной модели для прогноза неприливых вариаций гравитационного поля. Разработанная методика математического моделирования апробирована для территории Республики Беларусь с привлечением карты скоростей современных вертикальных движений земной коры, построенной по комплексу геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных. Результаты исследований показали, что применение корреляционной модели для прогноза неприливых вариаций гравитационного поля по скоростям современных вертикальных движений земной коры является весьма перспективным и способствует повышению достоверности построения карт вариаций гравитационного поля на территориях, слабо обеспеченных повторными гравиметрическими измерениями и состоящих из разновозрастных и разнотипных геоструктурных элементов.

**Для цитирования:** Маркович К.И. Моделирование неприливых вариаций гравитационного поля с использованием корреляционной модели прогноза // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64. № 3. С. 249–258. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-249-258.

## Введение

Геодезические измерения выполняются в реальном гравитационном поле и поэтому зависят от его состояния. Как известно, гравитационное поле не является стационарным в силу многочисленных причин (неравномерное вращение и изменение угловой скорости вращения Земли, перемещение масс внутри Земли, изменение среднего радиуса и др.), что накладывает определенные требования по учету вариаций гравитационного поля (ВГП) при обработке результатов повторных геодезических измерений. Наиболее ощутимо влияние ВГП может проявиться при анализе результатов повторного геометрического нивелирования. Известно [1, 2], что при исследовании современных вертикальных движений земной коры методом повторного геометрического нивелирования необходимо различать непосредственно вертикальные перемещения точек земной поверхности и смещения уровенных поверхностей, вызванные возможными ВГП.

Вопрос о влиянии изменения наклона уровенных поверхностей на результаты повторного геометрического нивелирования подробно рассмотрен более века назад в работе Фоглера [3], однако, лишь с недавнего времени появилась реальная возможность вычислить влияние изменения направления отвеса на результаты геометрического нивелирования на основании выполнения повторных гравиметрических съемок. Подобные расчеты для количественной оценки связи современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) и изменений ускорения силы тяжести выполнены В.Ф. Еремеевым, М.И. Юркиной, А.Ш. Файтельсоном, Э.Э. Фотиади, Г.И. Каратаевым, В.Г. Коломогоровым, В.Г. Черемисиним, В.И. Щегловым [4–6] и другими учеными, показали, что эти изменения могут существенно превышать влияние, которое можно отнести за счет современных вертикальных движений. Отдельно следует отметить работы Ю.В. Антонова, Д.В. Абрамова, С.Г. Бычкова, А.В. Овчаренко, М.Н. Дробышева, Д.В. Обраменко, В.Н. Кошенова [7–9] и других

ученых, связанные с оценкой, учетом и анализом изменения морфологии и интенсивности неприливных вариаций силы тяжести, что, несомненно, позволяет глубже понять природу данных вариаций.

Несмотря на всю строгость подхода по вычислению влияния ВГП на результаты повторного геометрического нивелирования, остается открытым вопрос получения значений изменения ускорения силы тяжести на территориях, расположенных между профилями повторной гравиметрической съемки. Особенно остро данная проблема стоит на территориях слабо обеспеченных повторными гравиметрическими измерениями.

В представленной статье будут рассмотрены вопросы моделирования вариаций гравитационного поля между профилями повторной гравиметрической съемки.

### Методика моделирования неприливных вариаций гравитационного поля с использованием корреляционной модели прогноза

Моделирование вариаций ускорения силы тяжести (изменений величины силы тяжести с течением времени) выполнено с использованием подхода профессора Г.И. Каратаева, основанного на разработках в области математического моделирования геолого-геофизических явлений и связанного с аксиоматической корреляционной моделью прогноза различных параметров земной коры по гравитационным аномалиям. Подход Г.И. Каратаева впервые апробирован для прогнозирования вариаций ускорения силы тяжести на территории Республики Беларусь. Прогнозирование вариаций ускорения силы тяжести выполнено по значениям скоростей СВДЗК.

Выбор данного параметра для прогнозирования обусловлен тем, что вариации ускорения силы тяжести, как и СВДЗК связаны с процессами в недрах Земли. Анализ результатов исследований Э.Э. Фотиади, П.П. Колмогоровой, Г.И. Каратаева, Ю.И. Кузнецова, В.К. Панкрушина, А.Т. Донабедова, К.В. Тимарева [6,

10–12] и других авторов показал, что пространственные изменения скоростей СВДЗК обусловлены преимущественно процессами, происходящими в мантии и носящими регионально-блоковый характер. Согласно [5] на территории бывшего СССР СВДЗК и вариации гравитационного поля содержат периодические компоненты, обусловленные достаточно простыми процессами, которые происходят в областях, закономерно расположенных в пространстве.

Из теории гравиметрии также известно и многочисленными исследованиями, приведенными в работах Н.П. Грушинского, С.В. Евсеева, И.Д. Жонголовича, Л.П. Пеллинина, С.А. Ушакова, Э.Э. Фотиади, G. Woollard, W. Heiskanen, W. Kaula и др., установлен факт зависимости аномалий ускорения силы тяжести поля от рельефа дневной поверхности. Исходя из общих соображений, вытекает косвенная связь между изменением ускорения силы тяжести и изменением скоростей СВДЗК.

Математический аппарат, используемый в данной статье для прогнозирования вариаций ускорения силы тяжести, подробно изложен в [10] и заключается в следующем. Изучаемая область разбивается на эталонную  $R^3$  (совокупность точек с заданными значениями ВГП  $\delta g_t^3$ ) и прогнозную  $R^K$  (совокупность точек, в которых требуется найти возможные значения ВГП  $\delta g_t^K$ ) области. На всей исследуемой области задаются скорости СВДЗК  $V$ , по которым предполагается прогноз  $\delta g_t^K$ . Постулируются следующие положения.

1. Если коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  формул связи между ВГП и скоростями СВДЗК двух различных областей найдены и применение коэффициента  $A_2$  в первой области, а  $A_1$  во второй дает значения ВГП, близкие к заданным, то коэффициенты считаются совпадающими, т.е. выполняется условие

$$\delta g_{t_1} - A_2 V_1 \leq \epsilon_0; \quad \delta g_{t_2} - A_1 V_2 \leq \epsilon_0, \quad (1)$$

где  $A_1 V_1$  — операция прогнозирования;  $\epsilon_0$  — точность прогнозирования.

2. Задается система правил разбиения изу-

чаемой территории со всё увеличивающимся числом классов ( $C_1, C_2, C_3, \dots, C_\varphi$ ) по геолого-геофизическим признакам. На основании этих постулатов строится схема прогноза. Необходимое условие — нахождение коэффициентов связи  $A_1$  между  $\delta g_t^3$  и  $V^3$ :

$$\delta g_t^3 \square A_1 V^3 \leq \epsilon_0 \text{ — связь найдена.}$$

При условии возможности использования коэффициентов  $A_1$  осуществляется прогноз в области  $R^K$ . В противном случае в геолого-геофизическом отношении прогнозная точка значительно отличается от эталонной области и необходимо выполнить разбиение исследуемой области согласно второй классификации  $C_2$ . При этом предполагается, что неизвестный фактор в каждом классе  $C_2$  действует постоянно и изменяется между классами.

### Исходные данные для прогнозирования вариаций ускорения силы тяжести

В качестве эталонной области  $R^3$  с известными значениями вариаций ускорения силы тяжести  $\delta g_t^3$  был выбран Белорусский геодинимический гравиметрический полигон (рис. 1), линии которого проходят через все крупные



Рис. 1. Схема Белорусского геодинимического гравиметрического полигона

Fig. 1. Scheme of the Belarusian geodynamic gravimetric test site

тектонические структуры страны. Данный полигон проложен по линии Лида–Россоны–Борисов–Калинковичи–Лида и состоит из 29 пунктов (шаг 30–50 км), расположенных как на стабильных блоках земной коры, так и в зонах глубинных разломов.

Вариации гравитационного поля на Белорусском геодинамическом гравиметрическом полигоне определялись на основании результатов гравиметрических измерений, выполненных «Институтом геологических наук НАН Беларуси» в 1996 г. двумя гравиметрами ГНУКС со средней ошибкой  $\pm 0,039$  мГал, и в 1998 г. — двумя гравиметрами ГНУКС и одним гравиметром ГНУКВ со средней ошибкой  $\pm 0,020$  мГал. Результаты повторных гравиметрических измерений относительно опорного гравиметрического пункта «Лида», расположенного на стабильном Вильнюсском блоке земной коры, представлены в [13].

Скорости СВДЗК  $V$  на исследуемую территорию задавались с использованием карты скоростей СВДЗК (рис. 2), процесс построения которой подробно описан в [14] и заключался в прогнозировании скоростей СВДЗК согласно описанного ранее подхода Г.И. Каратаева по комплексу геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных (скорости СВДЗК, аномалии ускорения силы тяжести в свободном воздухе и в редукции Буге, рельеф

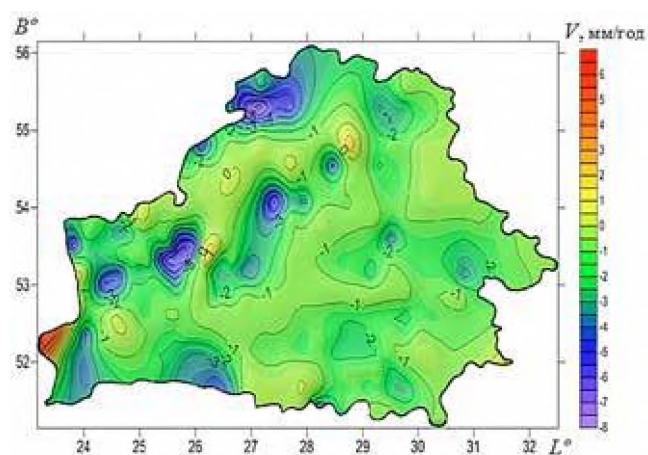


Рис. 2. Карта скоростей современных вертикальных движений земной коры Беларуси

Fig. 2. Speed map of modern vertical movements of the earth's crust of Belarus

дневной поверхности, мощность земной коры, магнитные аномалии, тектоническое районирование).

Сопоставление представленной карты скоростей СВДЗК с тектоническими разломами Республики Беларусь показало хорошую приуроченность зон высоких градиентов скоростей СВДЗК к границам региональных блоков в виде разломов, имеющих глубокое заложение в мантии, что согласно исследований Р.Е. Айзберга, А.С. Махнача, [15–16] является общей закономерностью для СВДЗК. Геотектонические особенности  $G$  задавались на основании «Карты тектонического районирования Беларуси», на которой представлены основные тектонические структуры исследуемой территории [17].

Общий вид уравнений, связывающих вариации ускорения силы тяжести  $\delta g_t$  и скорости СВДЗК  $V$ , имеет следующий вид:

$$\delta g_t = f(V, G),$$

где  $G$  — данные о геологическом строении земной коры, которые могут быть представлены в виде классификаций:  $C_1, C_2, \dots, C_\phi$ .

### Результаты исследований

На основании представленного набора данных составлены уравнения типа (1), в которых с помощью метода наименьших квадратов найдены неизвестные коэффициенты связи.

На рис. 3 приведены корреляционные поля, характеризующие тесноту связи вариаций ускорения силы тяжести  $\delta g_t$  со скоростями СВДЗК  $V$  в целом для всей территории Беларуси ( $C_1$ -классификация) по 29-и точкам. Скорости СВДЗК, также как и вариации ускорения силы тяжести здесь и далее представлены относительно гравиметрического пункта «Лида».

Анализ результатов, характеризующих тесноту связи вариаций ускорения силы тяжести  $\delta g_t$  и скоростей СВДЗК  $V$  в целом для всей территории Беларуси, показал отсутствие какой-либо значимой связи между перечисленными параметрами в данной  $C_1$ -классификации. Это говорит о том, что эм-

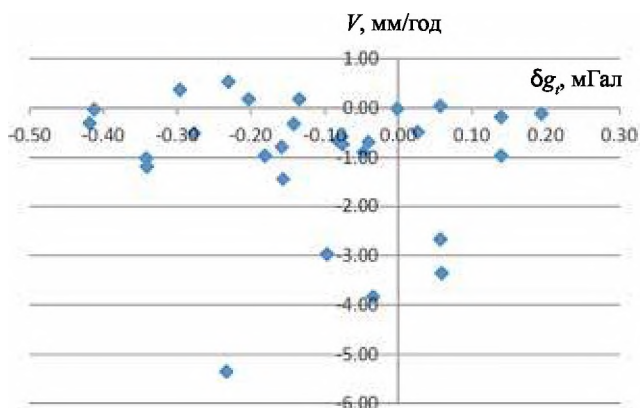


Рис. 3. Связь вариаций ускорения силы тяжести  $\delta g_t$  со скоростями СВДЗК  $V$  для всей территории Беларуси

Fig. 3. The relationship between the variations of the acceleration of gravity  $\delta g_t$  with the speeds of modern vertical movements of the earth's crust  $V$  for the whole territory of Belarus

пирические связи перечисленных параметров земной коры не могут быть описаны одним уравнением и должны описываться с помощью системы уравнений.

На основании представленного для поиска корреляционных связей между сопоставляемыми параметрами в соответствии с геотектоническими особенностями выполнено разделение исследуемой территории на основании «Карты тектонического районирования Беларуси» на классы ( $C_2$ -классификация): Белорусская антеклиз, Припятский прогиб, Полесская седловина, Латвийская седловина, Оршанская впадина.

Нахождение вида уравнения регрессии для каждой тектонической структуры осуществлялось на основе анализа построенных корреляционных графиков, характеризующих связи вариаций ускорения силы тяжести со скоростями СВДЗК. Детальный анализ корреляционных графиков для всех перечисленных выше структур  $C_2$ -классификации показал, что связь  $\delta g_t$  с  $V$  должна быть криволинейного типа и наилучшим образом определяется при использовании квадратичной функции вида:

$$\delta g_t = a + bV + cV^2,$$

где  $\delta g_t$  — изменение величины силы тяжести, мГал;  $V$  — скорости СВДЗК, мм/год;

$a, b, c$  — коэффициенты связи ВГП со скоростями СВДЗК.

Наличие связи между регрессионной моделью и эталонными значениями вариаций ускорения силы тяжести определялось при помощи корреляционного отношения для криволинейной функции [18]

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_E^2}{\sigma_Y^2},$$

где  $\sigma_Y^2 = \frac{[(\delta g_{t_i} - \delta g_{t_{cp}})^2]}{n}$  — мера общего разброса  $\delta g_t$  относительно среднего;

$\sigma_A^2 = \frac{[(\delta g_{t_i}^{MOD} - \delta g_{t_i})^2]}{n}$  — мера не объясненно-

го разброса  $\delta g_t$  относительно модели.

Для значимости корреляционного отношения выдвигалась нулевая гипотеза о незначимости исследуемого коэффициента, а затем строилась контрольная статистика  $F$  вида [18]

$$F = \frac{R^2(n-m-1)}{m(1-R^2)},$$

которая имеет  $F$ -распределение Фишера с  $f_1 = m$  и  $f_2 = n - m - 1$  степенями свободы и с  $m = k - 1$  ( $k$  — число коэффициентов при переменных). Получив теоретический квантиль  $F$ -распределения Фишера  $F_{P, f_1, f_2}$  далее выполнялась операция сравнения по схеме: если  $F > F_{P, f_1, f_2}$  то гипотеза о незначимости корреляционного отношения опровергается с доверительной вероятностью  $P$ .

Значение ошибки корреляционного отношения определялось с использованием формулы [19]

$$\sigma_R^2 = \frac{m(1-R^2)}{n-m-1}.$$

Оценка точности регрессионных моделей выполнена по внутренней сходимости модельных значений вариаций ускорения силы тяжести с эталонными значениями вариаций на Белорусском геодинамическом гравиметрическом полигоне, участвующими в моделировании

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum (V_{МОДЕЛЬ} - V_{ЭТАЛОН})^2}{n}}.$$

Таблица 1

Корреляционные связи вариаций ускорения силы тяжести  $\delta g_t$  со скоростями СВДЗК  $V$  для тектонических структур Беларуси

Наименование структур	Уравнение регрессии	$R^2$	$P$	$\sigma_R^2$	$\epsilon$	$\frac{\epsilon}{\delta g_t} \cdot 100\%$
Оршанская впадина	$\delta g_t = 0,15462 + 0,16234V + 0,11797V^2$	0,73	0,85	0,18	0,06	40-50
Латвийская седловина	$\delta g_t = 0,34325 - 0,1205V + 0,0099V^2$	0,62	0,65	0,33	0,11	40-50
Припятский прогиб	$\delta g_t = 0,28595 - 0,00011V + 0,28758V^2$	0,84	0,90	0,11	0,05	30-40
Белорусская антеклиза	$\delta g_t = 0,0585 + 0,01658V + 0,0004V^2$	0,25	0,55	0,25	0,13	90-100

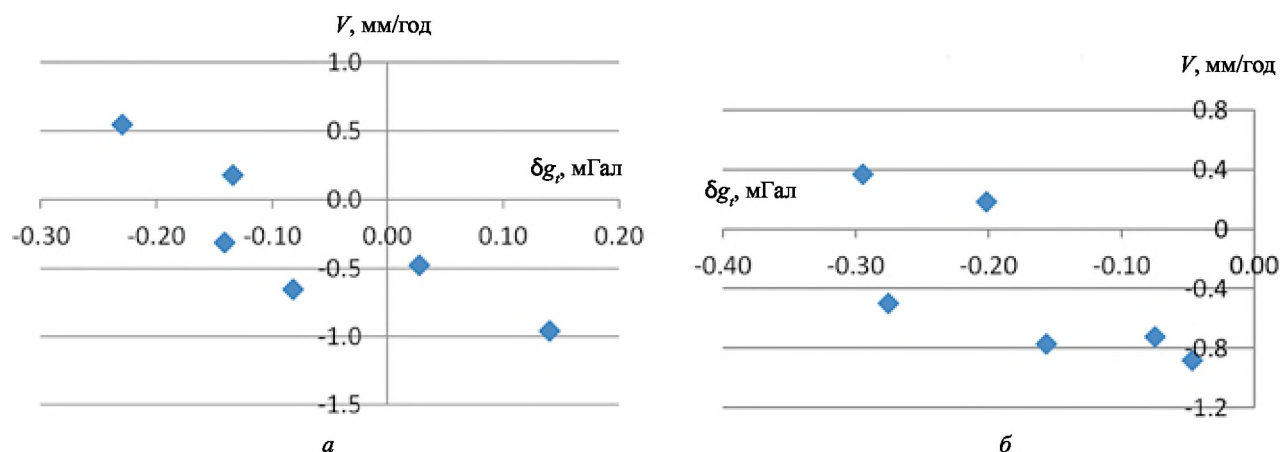


Рис. 4. Связь между вариациями ускорения силы тяжести  $\delta g_t$  и скоростями СВДЗК  $V$ :

$a$  — Оршанская впадина;  $b$  — Припятский прогиб

Fig. 4 The relationship between the variations of the acceleration of gravity  $\delta g_t$  and the velocities of modern vertical movements of the Earth's crust  $V$ :

$a$  — Orsha Depression;  $b$  — Pripjat trough

В табл. 1 и на рис. 4 представлены данные о связи ВГП  $\delta g_t$  со скоростями СВДЗК  $V$  для тектонических структур  $C_2$ -классификации.

На основании данных, представленных в табл. 1, можно утверждать о существовании связей между ВГП и скоростями СВДЗК для всех структур  $C_2$ -классификации кроме Белорусской антеклизы, связь ВГП со скоростями СВДЗК которой не может быть объяснена с достаточной точностью каким-либо видом уравнения регрессии. Наличие слабых корреляционных связей для территории Белорусской антеклизы подтверждает необходимость деления ее на классы (введение  $C_3$ -классификации): Центрально-Белорусский массив, Вилейский погребенный выступ (рис. 5), что позволило повысить значения корреляционных отношений структур Белорусской антеклизы до уровня тектонических структур из  $C_2$ -классификации (табл. 2).

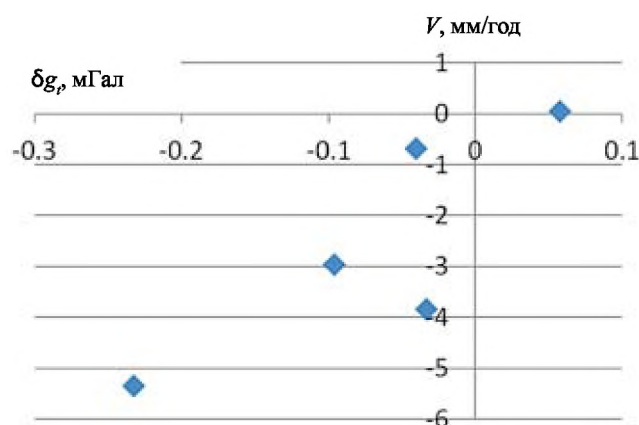


Рис. 5. Связь между вариациями ускорения силы тяжести  $\delta g_t$  и скоростями СВДЗК  $V$  Вилейского погребенного выступа

Fig. 5. The relationship between the variations of the acceleration of gravity  $\delta g_t$  and the velocities of modern vertical movements of the Earth's crust  $V$  Vileysky buried ledge

Используя уравнения корреляционных связей, (см. табл. 1, 2) сделан прогноз вариаций

Таблица 2

Корреляционные связи вариаций ускорения силы тяжести  $\delta g_t$  со скоростями СВДЗК  $V$  для тектонических структур Белорусской антеклизы

Наименование структур	Уравнение регрессии	$R^2$	$P$	$\sigma_R^2$	$\epsilon$	$\frac{\epsilon}{\delta g_t} \cdot 100\%$
Центрально-Белорусский массив	$\delta g_t = 0,00915 + 0,38369V + 0,11901V^2$	0,92	0,60	0,08	0,05	40 □ 50
Вилейский погребенный выступ	$\delta g_t = 0,01886 + 0,0079V \square 0,00642V^2$	0,75	0,90	0,25	0,05	40 □ 50

Таблица 3

Степень совпадения модельной карты вариаций ускорения силы тяжести с эталонными точками

Погрешности	Модель СВДЗК в сравнении с эталонными точками
$[\Delta]/n$ , мГал	□ 0,002
$+\Delta_{\max}$ , мГал	0,04
$\square \Delta_{\max}$ , мГал	□ 0,04
Число +разностей	14
Число □разностей	15
СКП, мГал	0,03

ций ускорения силы тяжести для исследуемой территории, который представлен в виде модельной карты вариаций ускорения силы тяжести с сечением изолиний через 0,02 мГал (рис. 6). Создание модельной карты выполнено с использованием сетки «Grid» с шагом 5'×5', в узлах которой определены значения ВГП согласно представленных в табл. 1, 2 уравнений связи. Интерполирование значений сетки «Grid» выполнено методом интерполяции «Kriging». Количественная характеристика степени совпадения модельной карты вариаций ускорения силы тяжести с эталонными точками, участвующими в моделировании, представлена в табл. 3.

Согласно табл. 3 можно отметить, что ошибки моделирования вариаций ускорения силы тяжести сопоставимы с точностью

инструментальных гравиметрических измерений, являющихся исходными для моделирования. Результаты моделирования показывают, что максимальные вариации ускорения силы тяжести наблюдаются в районе городов Лепель, Ушачи, Полоцк и составляют □ 0,20 – □ 0,32 мГал. Несмотря на то, что гравиметрические измерения были выполнены устаревшими гравиметрами не высокой точности ( $\pm 0,020 - \pm 0,039$  мГал), представленные в работе уравнения регрессии — весьма представительны.

Выполним расчет влияния данных вариаций ускорения силы тяжести на результаты повторного геометрического нивелирования. Для этого были определены величины изменения направления отвеса  $\Theta$  на исследуемой территории за представленный временной период  $T$  (1996 □ 1998 гг.) при условии равновероятности возмущения силы тяжести по каждой из трех осей декартовых координат [20]

$$\Theta^r = 2 \frac{\delta g_t}{g}, \quad (2)$$

где  $g$  — значения ускорения силы тяжести.

Модель изменения направления отвеса  $\Theta$  согласно (2) представлена на рис. 7. Ускорение силы тяжести получено по данным глобальной

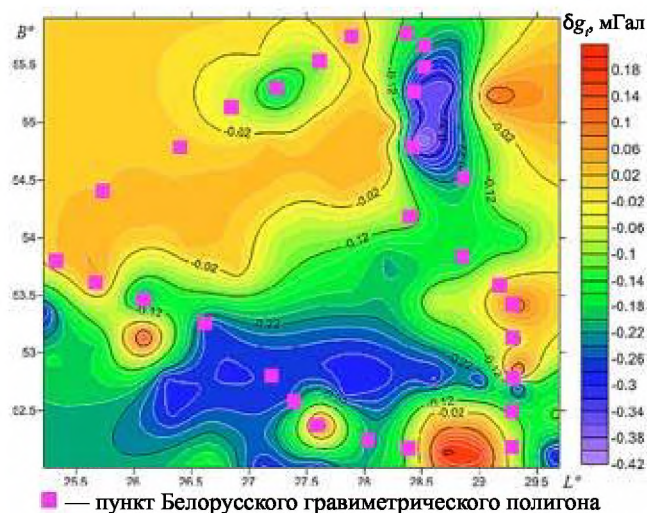


Рис. 6. Модельная карта вариаций ускорения силы тяжести на территорию Белорусского геодинимического гравиметрического полигона

Fig. 6. Model map of variations of the acceleration of gravity to the territory of the Belarusian geodynamic gravimetric test site

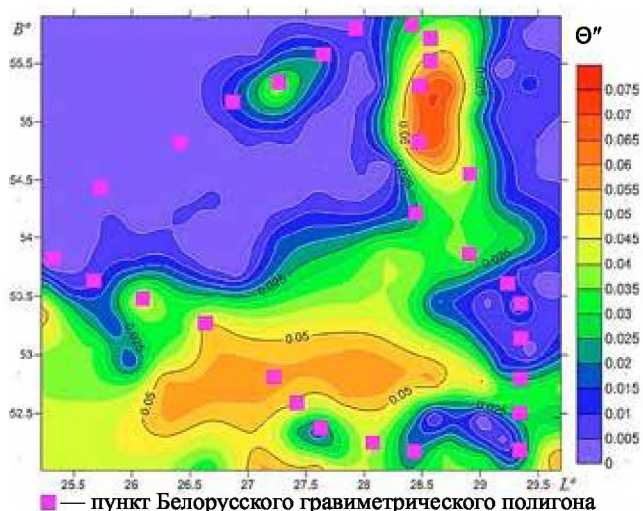


Рис. 7. Модельная карта изменения направления отвеса на территорию Белорусского геодинимического гравиметрического полигона

Fig. 7. Model map of the change in the direction of the plumbet to the territory of the Belarusian geodynamic gravimetric test site

модели поля силы тяжести Земли GECO, оценка точности которой для территории Беларуси показала хорошую сходимость модельных данных и результатов инструментальных гравиметрических измерений [21].

Расчет влияния изменения направления отвеса  $\Theta$  за представленный период на результаты геометрического нивелирования, проложенного по некоторым линиям Белорусского геодинимического гравиметрического полигона, представлен в табл. 4. Влияние на превышение между точками  $i$  и  $i+1$  составит [20]:

$$\Delta h = L \operatorname{tg} \left( \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} \right).$$

Изменение высот (см. табл. 4) получено при абсолютной неподвижности исследуемых точек. Рассчитанная величина  $\Delta h$  больше ошибок высокоточного нивелирования

$$m = \pm \sqrt{0,8^2 L + 0,08^2 L^2}.$$

### Заключение

Результаты прогнозирования неприливных вариаций ускорения силы тяжести по скоростям современных вертикальных движений земной коры позволяют сделать следующие выводы.

1. Применение корреляционной модели для прогноза ВГП по скоростям СВДЗК является весьма перспективным и способствует повышению достоверности построения карт вариаций ускорения силы тяжести на территориях, слабо обеспеченных повторными гравиметрическими измерениями и состоящих из разнотипных геоструктурных элементов.

2. Особое внимание при прогнозировании с использованием корреляционной модели следует уделить разделению изучаемой территории на классы с учетом изменчивости геолого-геофизических признаков.

3. Повышение точности прогноза вариаций ускорения силы тяжести возможно путем использования карт скоростей СВДЗК, построенных по комплексу геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных.

4. Анализ вариаций гравитационного поля по данным гравиметрических наблюдений Беларуси свидетельствует о необходимости учета изменения направления отвеса

Таблица 4

Влияние изменения направления отвеса  $\Theta$  за период 1996–1998 гг. на результаты геометрического нивелирования

Нивелирный ход	$L$ , км	$\Theta_p$ , "	$\Theta_{i+1}$ , "	$\Theta_{cp}$ , "	$\Delta h$ , мм	$m$ , мм
Янковичи–Полоцк...	40	0,043	0,055	0,049	9,5	6,0
Полоцк–Ушачи.....	40	0,055	0,064	0,060	11,6	6,0
Ушачи–Лепель.....	45	0,064	0,065	0,064	14,0	6,4
Лепель–Холопеничи	52	0,065	0,042	0,054	13,6	7,1
Кр. Слобода–Несвиж...	56	0,056	0,053	0,054	14,7	7,5
Старобин–Кр. Слобода.	27	0,049	0,056	0,052	6,8	4,7
Несвиж–Кореличи.....	58	0,053	0,047	0,050	14,1	7,7



при выполнении повторного геометрического нивелирования на равнинных и спокойных в геологическом отношении территориях Восточно-Европейской платформы.

**Благодарности.** Автор статьи выражает глубокую благодарность главному научному сотруднику Института природопользования НАН Беларуси, доктору геолого-минералогических наук, профессору Г.И. Каратаеву за ценные со-

веты и рекомендации при проведении исследования.

**Acknowledgments.** The author of the article expresses deep gratitude to the Chief Scientific Officer of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor Karatayev H.I. for valuable advice and recommendations during the study.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Юркина М.И. О совместном определении изменений гравитационного поля и вертикальных движений по повторным гравиметрическим и нивелирным наблюдениям // Геодезия и картография. 1986. № 11. С. 6–10.
2. Фотиади Э.Э. Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). Новосибирск: Наука, 1975. 276 с.
3. Volger Chr. August Uber Zeile und Hulfsmittel geometrischer Pracisions-Nivellements. Munchen. Literarisch-artistische Austalt (Th. Riedel) vormals der Cotta'schen Buch-handlung. 1873.
4. Еремеев В.Ф., Юркина М.И. Теория высот в гравитационном поле Земли. М.: Недра, 1971. 144 с.
5. Файтельсон А.Ш. Влияние вековых изменений силы тяжести на результаты повторного нивелирования // Докл. АН СССР. 1973. Т 213. № 6. С. 1274–1275.
6. Фотиади Э.Э., Каратаев Г.И., Коломогоров В.Г., Черемисин В.Г., Щеглов В.И. Вопросы теории и постановка наблюдений временных возмущений гравитационного и магнитного полей и движений земной поверхности в аспекте современных глубинных процессов // Проблемы современных движений земной коры: Третий Международный симпозиум. Л.: Академия наук СССР, 1969. С. 527–536.
7. Антонов Ю.В. Всплески неприливных вариаций силы тяжести // Геофизика. 2017. № 1. С. 28–34.
8. Абрамов Д.В., Бычков С.Г. Возможная природа пульсаций гравитационного поля // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 45-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. Казань: Казан. фед. ун-т., 2018. С. 16–18.
9. Дробышев М.Н., Абрамов Д.В., Бычков С.Г., Конешов В.Н., Герман М.И., Храпенко О.А., Горозжанцев С.В., Красилов С.А., Бебнев А.С., Овчаренко А.В. Эксперимент по изучению синхронных континентальных микросейсм в Северной Евразии методом комплексирования гравиметрических и сейсмических наблюдений // Геофизика. 2019. № 10 (2). С. 84–95.
10. Колмогорова П.П., Каратаев Г. И. Прогнозирование скоростей современных вертикальных движений земной коры с помощью корреляционной модели по статическим геолого-геофизическим данным //

#### REFERENCES

1. YURkina M.I. On the joint determination of changes in the gravitational field and vertical motions from repeated gravimetric and leveling observations. *Geodeziya i kartografiya*. 1986. 1: 6–10. [In Russian].
2. Fotiadi E.E. *Sovremennye dvizheniya zemnoj kory (issledovaniya na geodinamicheskikh poligonah)*. Modern movements of the earth's crust (studies at geodynamic test sites). Novosibirsk: Nauka, 1975: 276 p. [In Russian].
3. Volger Chr. August Uber Zeile und Hulfsmittel geometrischer Pracisions-Nivellements. Munchen. Literarisch-artistische Austalt (Th. Riedel) vormals der Cotta'schen Buch-handlung. 1873.
4. Eremeev V.F., YURkina M.I. *Teoriya vysot v gravitacionnom pole Zemli*. Theory of heights in the Earth's gravitational field. Moscow: Nedra, 1971: 144 p. [In Russian].
5. Fajtel'son A.SH. The influence of secular changes in gravity on the results of re-leveling. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1973, 213(6): 1274–1275. [In Russian].
6. Fotiadi E.E., Karataev G.I., Kolomogorov V.G., Chermisin V.G., SHCHeglov V.I. Issues of theory and the production of observations of temporary disturbances of the gravitational and magnetic fields and movements of the earth's surface in the aspect of modern deep-seated processes. *Problemy sovremennykh dvizhenij zemnoj kory: Tretij Mezhdunarodnyj simpozium*. Leningrad: USSR Academy of Sciences, 1969: 527–536. [In Russian].
7. Antonov YU.V. Bursts of non-tidal gravity variations. *Geofizika*. 2017, 1: 28–34. [In Russian].
8. Abramov D.V., Bychkov S.G. Possible nature of gravitational field pulsations. *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretacii geofizicheskikh polej: materialy 45-j sessii Mezhdunarodnogo seminara imeni D.G. Uspenskogo*. Kazan: Kazan Federal University, 2018: 16–18. [In Russian].
9. Drobyshev M.N., Abramov D.V., Bychkov S.G., Koneshov V.N., German M.I., Hrapenko O.A., Gorozhancev S.V., Krasilov S.A., Bebnev A.S., Ovcharenko A.V. An experiment on the study of synchronous continental microseisms in Northern Eurasia by the method of combining gravimetric and seismic observations. *Geofizika*. 2019, 10(2): 84–95. [In Russian].

Методические вопросы исследования современных движений земной коры. 1975. С. 182–203.

11. Кузнецов Ю.И., Панкрушин В.К. Математическое моделирование и рекуррентная идентификация геодинамических систем на основе механики Гамильтона-Лагранжа // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2005. №3 С. 3–12.

12. Донабедов А.Т., Сидоров В.А., Тимарев К.В., Торховская Л.Н. К вопросу о соотношениях между скоростями современных вертикальных движений земной коры, геофизическими полями и геоструктурными элементами // Докл. АН СССР. 1960. № 4. С. 810–813.

13. Сас-Ухрыновски А., Мрочек С., Каратаев Г.И., Белов Ю.В., Карагодина О.И. Структура мониторинговой геофизической сети и неприливные вариации во времени поля силы тяжести // Литасфера. 2001. №1 С. 120–130.

14. Маркович К.И. Алгоритм построения карты скоростей современных вертикальных движений земной коры по геодезическим, геолого-геофизическим и сейсмологическим данным // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: материалы 7 Междунар. науч.-техн. конф. Пермь: Пермский гос. нац. иссл. ун-т., 2019. С. 181–186.

15. Айзберг Р.Е. Разломы земной коры Беларуси. Минск: Красико-Принт, 2007. 372 с.

16. Махнач А.А. Краткий очерк геологии Беларуси и смежных территорий. Минск: Беларуская навука, 2014. 190 с.

17. Махнач А.А., Гарецкий Р.Г., Матвеев А.В. Геология Беларуси. Минск: Ин-т геол. наук НАН Беларуси, 2001. 815 с.

18. Большаков В.Д., Маркузе Ю.И., Голубев В.В. Уравнивание геодезических построений. М.: Недра, 1989. 417 с.

19. Дегтярев А.М. Вероятностно-статистические методы в геодезии. Новополоцк: ПГУ, 2005. 208 с.

20. Фотиади Э.Э. Современные движения земной коры. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1976. 206 с.

21. Маркович К.И. Приведение результатов геометрического нивелирования в систему нормальных высот с использованием глобальных гравитационных моделей Земли // Геодезия и картография. 2018. № 5. С. 2–9.

10. Kolmogorova P.P., Karataev G.I. Prediction of the speeds of modern vertical movements of the earth's crust using a correlation model according to static geological and geophysical data. *Metodicheskie voprosy issledovaniya sovremennykh dvizhenij zemnoj kory*. 1975: 182–203. [In Russian].

11. Kuznecov YU.I., Pankrushin V.K. Mathematical modeling and recurrent identification of geodynamic systems based on Hamilton-Lagrange mechanics. *Intereskpo Geo-Sibir'*. 2005, 3: 3–12. [In Russian].

12. Donabedov A.T., Sidorov V. A., Timarev K.V., Torhovskaya L.N. On the relationship between the speeds of modern vertical movements of the earth's crust, geophysical fields and geostructural elements. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1960, 4: 810–813. [In Russian].

13. Sas-Uhrynovski A., Mrochek S., Karataev G.I., Belov YU.V., Karagodina O.I. The structure of the monitoring geophysical network and non-tidal variations in time of the gravity field. *Litasfera*. 2001, 1: 120–130. [In Russian].

14. Markovich K.I. Algorithm for constructing a velocity map of modern vertical movements of the earth's crust according to geodetic, geological, geophysical, and seismological data. *Teoriya i praktika razvedochnoj i promyslovoj geofiziki: materialy 7-ej Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Perm: Perm State National Research University, 2019: 181–186. [In Russian].

15. Ajzberg R.E. *Razlomy zemnoj kory Belarusi*. Faults of the earth's crust of Belarus. Минск: Krasiko-Print, 2007: 372 p. [In Russian].

16. Mahnach A.A. *Kratkij ocherk geologii Belarusi i smezhnyh territorij*. A brief outline of the geology of Belarus and related territories. Минск: BelaruskayaNavuka, 2014: 190 p. [In Russian].

17. Mahnach A.A., Gareckij R.G., Matveev A.V. *i dr. Geologiya Belarusi*. Geology of Belarus. Минск: Institute of Geol. sciences of NAS of Belarus, 2001: 815 p. [In Russian].

18. Bol'shakov V.D., Markuze YU.I., Golubev V.V. *Uravniwanie geodezicheskikh postroenij*. Adjustment of geodetic constructions. Moscow: Nedra, 1989: 417 p. [In Russian].

19. Degtyarev A.M. *Veroyatnostno-statisticheskie metody v geodezii*. Probabilistic and statistical methods in geodesy. Novopolock: PGU, 2005: 208 p. [In Russian].

20. Fotiadi E.E. *Sovremennye dvizheniya zemnoj kory*. Modern movements of the earth's crust. Novosibirsk: IGI SB AS USSR, 1976: 206 p. [In Russian].

21. Markovich K.I. Reduction of the results of geometric leveling into a system of normal heights using global gravity models of the Earth. *Geodeziya i kartografiya*. 2018, 5: 2–9. [In Russian].