

**PREDICTION OF VELOCITIES OF MODERN VERTICAL MOVEMENTS OF THE EARTH'S CRUST
FROM GEODETIC, GEOPHYSICAL AND SEISMOLOGICAL DATA****K.I. Markovich**

Polotsk state University, Novopolotsk, Belarus

ABSTRACT. The paper presents the results of the study aimed at predicting velocities of modern vertical movements of the Earth's crust, which used the approach developed by Professor G.I. Karataev. This approach is based on mathematical simulation of geological and geophysical phenomena and an axiomatic correlation model for predicting various parameters of the crust from the data on gravitational anomalies. We pioneer in using this approach to study the territory of Belarus on the basis of geodetic, geological, geophysical and seismological data, as well as modern models showing gravitational fields and topography. This paper presents regression equations between the modern vertical movement velocities, gravitational and magnetic fields, crust thickness, and topography data. These equations give reasonably accurate data for constructing a map of forecasted modern vertical movement velocities for the territory of Belarus. Our map proves that the approach based on a correlation model and a complex of geodetic, geological, geophysical and seismological data for predicting the modern vertical movement velocities is very promising and capable of improving the reliability of forecast mapping. It should be noted that other maps of modern vertical crustal movement velocities for territories, including the geostructural elements of different ages and different types, were constructed using the method of simple linear interpolation, which is highly likely to cause prediction errors. In such case, prediction of modern vertical crustal movement velocities should be based on established patterns and correlations between the crustal movements, geophysical fields, and development history of geological structures and their elements.

KEYWORDS: modern vertical movements of the Earth's crust; mathematical simulation / modeling; correlation relationship; global model of the gravitational fields and topography of the Earth; magnetic anomaly; crust thickness; tectonic zoning

RESEARCH ARTICLE

Received: June 5, 2019

Revised: December 11, 2019

Accepted: January 9, 2020

FOR CITATION: Markovich K.I., 2020. Prediction of velocities of modern vertical movements of the Earth's crust from geodetic, geophysical and seismological data. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (2), 365–377. doi:10.5800/GT-2020-11-2-0480

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ, ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

К.И. Маркович

Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь

АННОТАЦИЯ. В работе описаны исследования по прогнозированию скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) с использованием подхода профессора Г.И. Каратаева, базирующегося на разработках в области математического моделирования геолого-геофизических явлений и связанного с аксиоматической корреляционной моделью прогноза различных параметров земной коры по гравитационным аномалиям. Данный подход впервые применен для территории Беларуси с широким привлечением геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных, а также появившихся в настоящее время моделей Земли, прежде всего гравитационного поля и рельефа. Представленные в работе уравнения регрессии между скоростями современных вертикальных движений земной коры и гравитационным и магнитным полями, мощностью земной коры и рельефом дневной поверхности дают результаты с точностью, вполне приемлемой для построения прогнозных карт скоростей СВДЗК Беларуси. Построенная в работе карта скоростей СВДЗК доказывает, что применение корреляционной модели и комплекса геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных для прогноза скоростей СВДЗК является весьма перспективным и способствует повышению достоверности построения карт. Применение же метода простого линейного интерполирования, используемого при построении существующих карт скоростей СВДЗК на территориях, состоящих из разновозрастных и разнотипных геоструктурных элементов, не оправдывает себя и заведомо ведет к ошибкам прогнозирования. Прогнозирование скоростей СВДЗК в таком случае должно основываться на установленных закономерностях соотношений и корреляционных связях между современными вертикальными движениями, геофизическими полями, историей развития и различными элементами геологических структур.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: современные вертикальные движения земной коры; математическое моделирование; корреляционная связь; глобальная модель гравитационного поля и рельефа Земли; магнитная аномалия; мощность земной коры; тектоническое районирование

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) в пространственном аспекте может выполняться как на основании результатов изучения общих закономерностей исследуемого процесса и его применения в прогнозируемых областях, так и методами аналогии путем установления соотношений и корреляционных связей между скоростями СВДЗК, геофизическими полями, историей развития и различными элементами геологических структур – мощностью земной коры, ее блоковой структурой и разломной тектоникой.

Классическим примером использования первого подхода является применение простого линейного интерполирования при прогнозировании скоростей СВДЗК, не учитывающего геоморфологические показатели различных областей в связи с редкой сетью линий повторного нивелирования. Примером второго подхода являются методы математического моделирования: Фурье-анализ [Sharoglazova, 2010], метод средней квадратической коллокации [Meshcheryakov, Skryl, 1982], рекуррентный прогноз, модели авторегрессии и скользящего среднего, сингулярно-спектральное разложение, использующие различные исходные данные и методику расчета для прогнозирования скоростей СВДЗК.

Недостатком перечисленных методов математического моделирования является то, что они не учитывают комплексную природу геодинамических процессов, сопровождающуюся деформациями земной коры, изменением геофизических полей, корреляцией с рельефом и внутренним строением Земли. Максимально условию комплексности в плане установления эмпирических связей между СВДЗК и геолого-геофизическими данными удовлетворяет подход профессора Г.И. Каратаева [Karataev, 1966], базирующийся на разработках в области математического моделирования геолого-геофизических явлений и связанный с аксиоматической корреляционной моделью прогноза различных параметров земной коры по гравитационным аномалиям. На основании данного подхода в представленной статье автором впервые для территории Республики Беларусь выполнено прогнозирование в пространственном аспекте скоростей СВДЗК с помощью корреляционной модели по геодезическим, геолого-геофизическим и сейсмологическим данным.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Теоретической основой прогнозирования являлась методика Г.И. Каратаева. Суть предложенной концепции применительно к установлению эмпирических связей

между СВДЗК, геодезическими, геолого-геофизическими и сейсмологическими данными и прогнозированию СВДЗК состоит в следующем.

Исследуемая область разбивается на эталонную R^3 (совокупность точек с заданными значениями скоростей СВДЗК – V^3) и прогнозную R^k (совокупность точек, в которых требуется найти возможные значения скоростей СВДЗК – V^k) области. На всей исследуемой области задаются геодезические, геолого-геофизические и сейсмологические данные g_i , по которым предполагается прогноз V^k . Постулируются следующие положения [Kolmogorova, Karataev, 1975]:

1. Если коэффициенты A_1 и A_2 формул связи (1) между скоростями и геодезическими, геолого-геофизическими и сейсмологическими данными двух различных областей найдены и применение коэффициента A_2 в первой области, а A_1 во второй дает значения скоростей, близкие к заданным, то коэффициенты считаются совпадающими, т.е. выполняется условие:

$$V_1 - A_2 g_1 \leq \varepsilon_0, \quad V_2 - A_1 g_2 \leq \varepsilon_0, \quad (1)$$

где $A_i g_i$ – операция прогнозирования, ε_0 – точность прогнозирования.

2. Задается система правил классификаций изучаемой территории со все увеличивающимся числом классов ($C_1, C_2, C_3, \dots, C_\varphi$) по геолого-геофизическим признакам (правила разбиения территории).

На основании этих постулатов строится схема прогноза. Необходимым условием является нахождение коэффициентов связи A_1 между V^3 и g^3 :

$$V^3 - A_1 g^3 \leq \varepsilon_0, \quad (2)$$

связь найдена.

При условии возможности использования коэффициентов A_i 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.

Использование в [Kolmogorova, Karataev, 1975] представленного математического аппарата и набора геофизических и геодезических параметров в виде аномалий ускорения силы тяжести в редукции Буге, скоростей СВДЗК на таких отдельно взятых географических районах, как Украинский кристаллический щит, Воронежская антеклиз, Днепровско-Донецкая впадина, Карпаты, Прибайкалье, Забайкалье, Кавказ, показало хорошие результаты поиска операторов прогноза для практического построения карт скоростей СВДЗК, что подтверждает достоверность подхода Г.И. Каратаева по установлению эмпирических связей между СВДЗК и геофизическими и геодезическими данными.

Таким образом, на основе комплексности в изучении геодинамических процессов с учетом современных возможностей и накопленной измерительной информации

о геолого-геофизических полях в рамках представленной статьи автором выполнен поиск корреляционных связей скоростей СВДЗК территории Республики Беларусь с такими геодезическими, геолого-геофизическими, и сейсмологическими параметрами, как рельеф дневной поверхности, гравитационное и магнитное поле, мощность земной коры (поверхность Мохо), тектоническое районирование. Выбор представленных параметров обусловлен результатами исследований Р.Г. Гарецкого, А.Т. Донабедрова, Г.И. Каратаева, П.П. Колмогоровой, В.Г. Кузнецовой, Э.Э. Фотиади [Garetsky, 1991; Donabedov et al., 1960; Kolmogorova, Karataev, 1975; Kuznetsova, 1973; Fotiadi, 1970] и других авторов по изучению изменений СВДЗК и связи их с процессами, происходящими в мантии и носящими регионально-блоковый характер.

На основании вышеперечисленного список параметров, участвующих в исследовании, включал в себя скорости СВДЗК V , рельеф дневной поверхности h , аномалии ускорения силы тяжести в свободном воздухе $\Delta g_{\text{СВ.В}}$ и в редукции Буге $\Delta g_{\text{БУГЕ}}$, мощность земной коры $H_{\text{МОХО}}$, магнитные аномалии ΔT , тектоническое районирование G .

Уравнение, связывающее скорости СВДЗК с перечисленными параметрами, имеет следующий вид:

$$V = f(h, \Delta g, H_{\text{МОХО}}, \Delta T, G), \quad (3)$$

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

Исходным материалом для определения числовых характеристик вертикальной составляющей СВДЗК территории Республики Беларусь являлась Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР масштаба 1:5000000, созданная в 1989 г. на основании результатов повторного нивелирования [Kashin, 1989]. Фрагмент карты СВДЗК ГУГК на территорию Беларуси представлен на рис. 1.

Согласно пояснительной записке «Геодезическая основа карты современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) территории СССР в масштабе 1:5000000», общее количество реперов для первого и повторного циклов нивелирования составляет 23144, интервалы между циклами нивелирования: средний интервал 26 лет, более 30 лет составляет 30 %, менее 10 лет – 10 % от общего объема линий повторного нивелирования. Изолинии на карте проведены через 2 мм/год.

Согласно [Sharoglazova et al., 2009], на территорию Беларуси в настоящее время существует всего две карты скоростей СВДЗК. Выбор представленной карты ГУГК 1989 г. обоснован тем, что на ней, в отличие от второй существующей Схематической карты СВДЗК территории Беларуси и Прибалтики, приведены абсолютные скорости СВДЗК. В качестве исходных для вычисления абсолютных скоростей использованы результаты многолетних наблюдений на 41 уровнемерном посту,

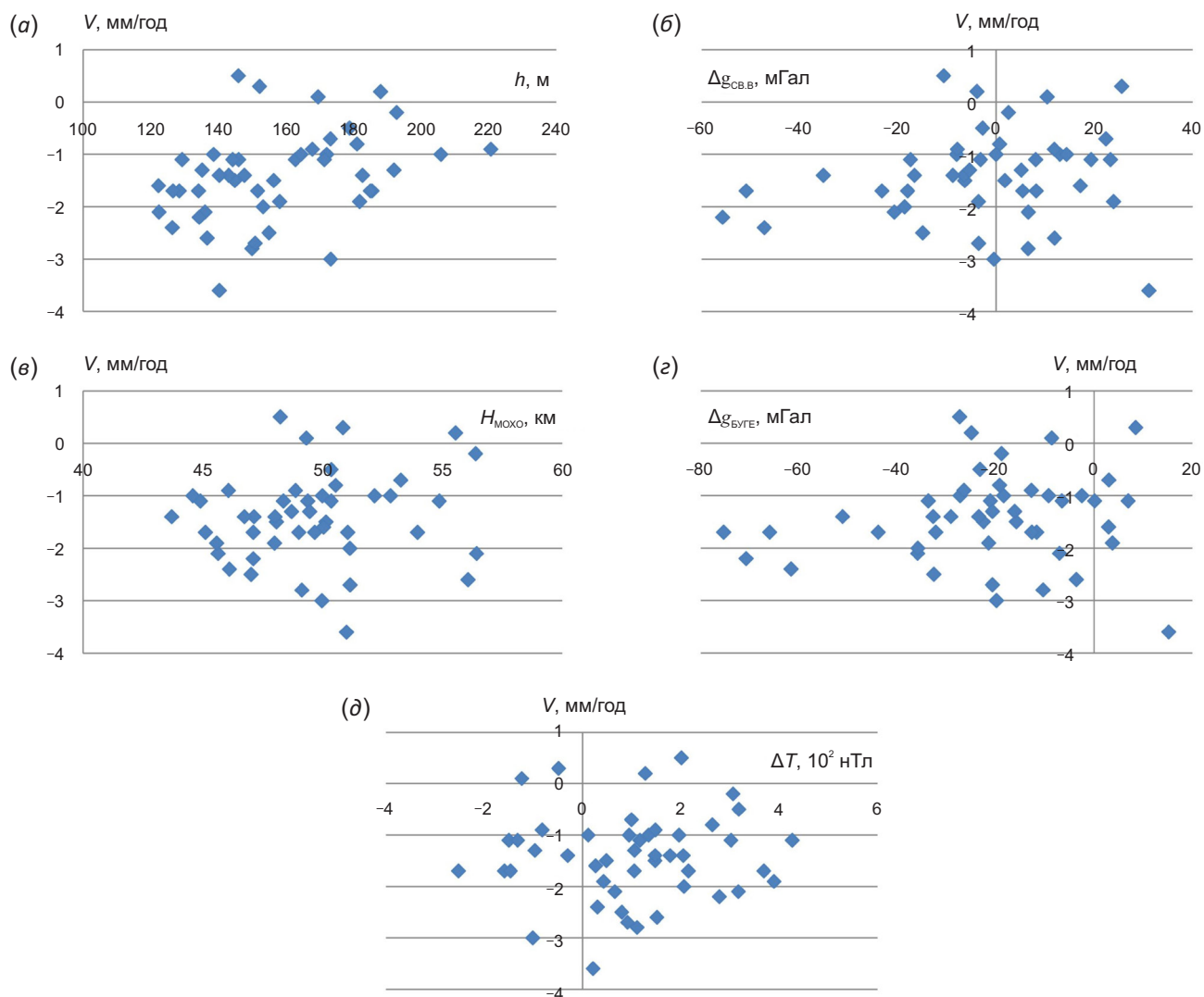


Рис. 2. Корреляционные поля, характеризующие тесноту связи скоростей СВДЗК всей территории Беларуси со следующими параметрами: (а) – рельеф дневной поверхности; (б)–(в) – аномалии ускорения силы тяжести в свободном воздухе и редукции Буге; (г) – мощность земной коры; (д) – магнитные аномалии.

Fig. 2. Correlation fields for the territory of Belarus, which characterize a close relationship between the modern vertical crustal movement velocities and the following parameters: (а) – surface relief; (б)–(в) – gravity acceleration anomalies in free air and Bouguer reduction; (г) – crust thickness; (д) – magnetic anomalies.

антеклизы присутствуют разновозрастные структурные этажи, ограниченные разломами, имеющими амплитуду первые десятки метров [Makhnach, 2014].

Для Припятского прогиба характерна чрезвычайно сложная складчато-блоковая тектоника. Здесь выделяются тектонические ступени, горсты, грабены, которые, как и сам прогиб в целом, образовались в результате блоковых движений на линиях разломов. Тектоника Припятского прогиба определяется строением поверхности фундамента. Одним из главных факторов в расчленении поверхности фундамента являются зоны субширотных разломов (амплитуда 1–3 км), расчленяющих территорию прогиба на серию линейно вытянутых пластинообразных блоков. Границами Припятского прогиба является система ступенчатых сбросов с амплитудой 2–4 км [Aizberg, 2013].

Оршанская впадина является отрицательной тектонической структурой поверхности фундамента в западной части Восточно-Европейской платформы и расположена на северо-востоке Беларуси. Оршанская впадина характеризуется резким наклоном поверхности фундамента с градиентом наклона до 20–30 м/км. Максимальное погружение впадины, накопление мощной толщи красноцветных песчаников оршанской свиты рифея связаны с раннебайкальским этапом формирования [Aizberg, 2007].

По данным сейсморазведки, поверхность фундамента в пределах Подляско-Брестской впадины погружается с востока на запад от –0.5 до –5.0 км. С севера и юга Подляско-Брестская впадина ограничена разломами субширотного простирания – Свислочским и Северо-Ратновским. На западе впадина ограничена системой

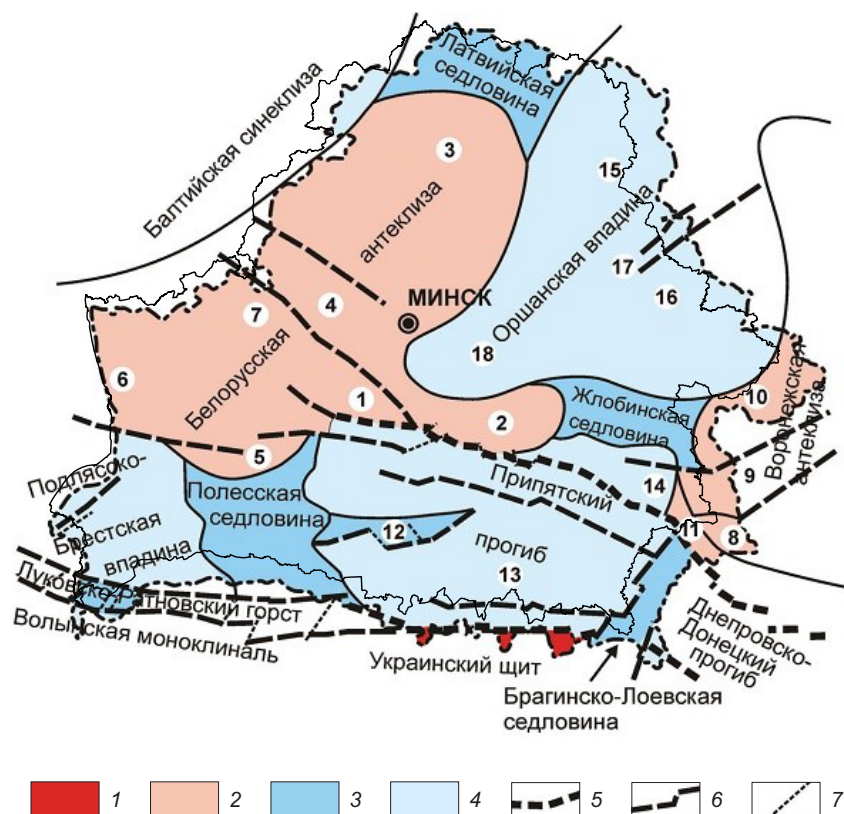


Рис. 3. Карта тектонического районирования территории Беларуси [Makhnach et al., 2001].

1–4 – структурные элементы: 1 – кристаллический щит, 2 – антеклизы, 3 – седловины, выступы, горсты, 4 – прогибы, впадины, синеклизы; 5–7 – разломы: 5 – суперрегиональные, 6 – региональные и субрегиональные, 7 – локальные; цифры на карте: 1 – Бобовнянский погребенный выступ, 2 – Бобрыйский погребенный выступ, 3 – Вилейский погребенный выступ, 4 – Воложинский грабен, 5 – Ивацевичский погребенный выступ, 6 – Мазурский погребенный выступ, 7 – Центрально-Белорусский массив, 8 – Гремячский погребенный выступ, 9 – Клиновский грабен, 10 – Суражский погребенный выступ, 11 – Гомельская структурная перемычка, 12 – Микашевичско-Житковичский выступ, 13 – Припятский грабен, 14 – Северо-Припятское плечо, 15 – Витебская мулда, 16 – Могилевская мулда, 17 – Центрально-Оршанский горст, 18 – Червенский структурный залив.

Fig. 3. Map of tectonic zoning of the territory of Belarus [Makhnach et al., 2001].

1–4 – structural elements: 1 – crystalline shield, 2 – anticlises, 3 – saddles, ledges, horsts, 4 – deflections, depressions, synclises; 5–7 – faults: 5 – super-regional, 6 – regional and sub-regional, 7 – local; numbers in the map: 1 – Bobovnyansk buried ledge, 2 – Bobruisk buried ledge, 3 – Viley buried ledge, 4 – Volozhin graben, 5 – Ivatsevich buried ledge, 6 – Mazur buried ledge, 7 – Central Belorussian massif, 8 – Gremyachsky buried ledge, 9 – Klintsov graben, 10 – Surazh buried ledge, 11 – Gomel structural bridge, 12 – Mikashevich-Zhitkovich ledge, 13 – Pripyat graben, 14 – North Pripyat shoulder, 15 – Vitebsk trough, 16 – Mogilev trough, 17 – Central Orsha horst, 18 – Cherven structural bay.

глубинных разломов, известных в геологической литературе как линия Тейссейра – Торнквиста.

Полеская седловина является поперечной приподнятой структурой, соединяющей Украинский кристаллический щит с Белорусской антеклизой. На севере Полеская седловина ограничена Свислочским и Ляховичским разломами, на юге – Северо-Ратновским разломом. По поверхности фундамента седловина имеет субмеридиональное простирание с глубиной заложения от –0.2 до –0.9 км и площадью структуры 15 тыс. км². В восточной части Полеской седловины располагается Микашевичско-Житковичский выступ, заходящий клином в Припятский прогиб [Bogdasarov, 2011].

Нахождение уравнения регрессии $f_i (i=1,2,\dots,\varphi)$ в каждом классе осуществлялось на основе анализа построенных для каждой отдельной структуры корреляционных

графиков, характеризующих связи скоростей СВДЗК с представленными выше параметрами. Использование различных видов функций и детальный анализ графиков корреляции скоростей СВДЗК для всех перечисленных выше структур C_2 -классификации показали, что связь V с Δg , $H_{\text{МОХО}}$, ΔT , h должна быть криволинейного типа и наилучшим образом определяется при использовании квадратичной функции вида:

$$V = \sum_{j=1}^K (a_j + b_j X + c_j X^2), \quad (5)$$

где X – один из перечисленных геодезических, геолого-геофизических параметров; a , b , c – коэффициенты связи перечисленных параметров со скоростями СВДЗК.

Использование в (5) дополнительного члена в виде dX^3 не приводит к значительному изменению конечного

результата, и поэтому при прогнозировании он не учитывался.

Наличие связи между регрессионной моделью и эталонными значениями скоростей определялось при помощи корреляционного отношения (6) для криволинейной функции.

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_E^2}{\sigma_V^2}, \quad (6)$$

где $\sigma_V^2 = \frac{[(V_i - V_{CP})^2]}{n}$ – мера общего разброса V относительно среднего;

$\sigma_E^2 = \frac{[(V_1^{MOD} - V_1)^2]}{n}$ – мера остаточного (необъясненно-

го) разброса V относительно модели.

Средняя квадратическая погрешность коэффициента корреляции определялась с использованием формулы [Bulatov, 1990]:

$$\sigma_R \approx \frac{1 - R^2}{\sqrt{n}}. \quad (7)$$

Оценка точности полученных регрессионных моделей выполнена по внутренней сходимости модельных скоростей с эталонными скоростями, участвующими в построении модели [Kashin, 1989].

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{[\Delta V^2]}{n}}. \quad (8)$$

Для иллюстрации представленного положения в табл. 1, 2, 3, 4, 5 и на рис. 4, 5, 6, 7 приведены данные

о связи V с $\Delta g_{CB,B}$, Δg_{BUTE} , h , H_{MOXO} , ΔT для тектонических структур Беларуси C_2 -классификации.

Из анализа представленных таблиц и графиков корреляционных связей нетрудно увидеть, что даже при простой форме связи, но с учетом изменчивости параметра G связь скоростей СВДЗК со всеми перечисленными параметрами является достаточно тесной, а изменчивость V достаточно хорошо объясняется с помощью аномалий ускорения силы тяжести в свободном воздухе $\Delta g_{CB,B}$ и в редукции Буге Δg_{BUTE} , рельефа дневной поверхности h , мощности земной коры H_{MOXO} , магнитных аномалий ΔT в данных квадратичных регрессионных моделях для всех тектонических структур территории Республики Беларусь кроме Белорусской антеклизы. Из перечисленных параметров V с ΔT имеют наиболее слабые корреляционные связи для всех тектонических структур, что объясняется сильной изменчивостью магнитного поля в местах границ региональных блоков в виде разломов [Astapenko, 2012].

Наличие слабых корреляционных связей по всем параметрам для территории Белорусской антеклизы говорит о необходимости ее деления на отдельные структуры (введение C_3 -классификации): Центрально-Белорусский массив (семь исходных реперов для прогнозирования), Вилейский погребенный выступ (семь реперов), Бобруйский погребенный выступ, Воложинский грабен и Ивацевичский погребенный выступ. Однако поиск корреляционных связей для трех последних структур C_3 -классификации не удалось выполнить из-за их небольших размеров и, как следствие, малого количества эталонных точек с известными скоростями СВДЗК.

Таблица 1. Корреляционные связи V с $\Delta g_{CB,B}$ (мГал) для тектонических структур Беларуси

Table 1. Correlation relationships between V and $\Delta g_{FREEAIR}$ (mGal) for the tectonic structure of Belarus

Наименование структуры	Уравнение регрессии	R	R^2	σ_R	ε , мм	$\frac{\varepsilon}{V} \cdot 100\%$
Оршанская впадина	$V = -0.625 - 0.0587\Delta g_{CB,B} - 0.0077\Delta g_{CB,B}^2$	0.75	0.56	0.15	0.44	($\approx 20-40\%$)
Припятский прогиб	$V = -1.151 + 0.01866\Delta g_{CB,B} + 0.000076\Delta g_{CB,B}^2$	0.76	0.57	0.14	0.28	($\approx 20-30\%$)
Полесская седловина	$V = -2.064 - 0.1553\Delta g_{CB,B} + 0.0034\Delta g_{CB,B}^2$	0.95	0.90	0.04	0.42	($\approx 30-40\%$)
Подляско-Брестская впадина	$V = -1.015 + 0.1208\Delta g_{CB,B} + 0.0036\Delta g_{CB,B}^2$	0.73	0.56	0.18	0.40	($\approx 20-40\%$)
Белорусская антеклиза	$V = -1.778 + 0.0288\Delta g_{CB,B} + 0.000037\Delta g_{CB,B}^2$	0.34	0.11	0.22	0.69	($\approx 30-70\%$)

Таблица 2. Корреляционные связи V с Δg_{BUTE} (мГал) для тектонических структур Беларуси

Table 2. Correlation relationships between V and Δg_{BUGE} (mGal) for the tectonic structures of Belarus

Наименование структуры	Уравнение регрессии	R	R^2	σ_R	ε , мм	$\frac{\varepsilon}{V} \cdot 100\%$
Оршанская впадина	$V = -7.587 - 0.6047\Delta g_{BUTE} - 0.01276\Delta g_{BUTE}^2$	0.84	0.71	0.10	0.36	($\approx 20-40\%$)
Припятский прогиб	$V = -0.887 + 0.018\Delta g_{BUTE} + 0.000037\Delta g_{BUTE}^2$	0.75	0.56	0.14	0.30	($\approx 20-30\%$)
Полесская седловина	$V = -3.824 - 0.0395\Delta g_{BUTE} + 0.0037\Delta g_{BUTE}^2$	0.96	0.92	0.03	0.37	($\approx 30-40\%$)
Подляско-Брестская впадина	$V = 1.297 + 0.1581\Delta g_{BUTE} + 0.00178\Delta g_{BUTE}^2$	0.75	0.56	0.18	0.39	($\approx 20-40\%$)
Белорусская антеклиза	$V = -1.316 + 0.021\Delta g_{BUTE} + 0.00018\Delta g_{BUTE}^2$	0.22	0.05	0.24	0.72	($\approx 30-70\%$)

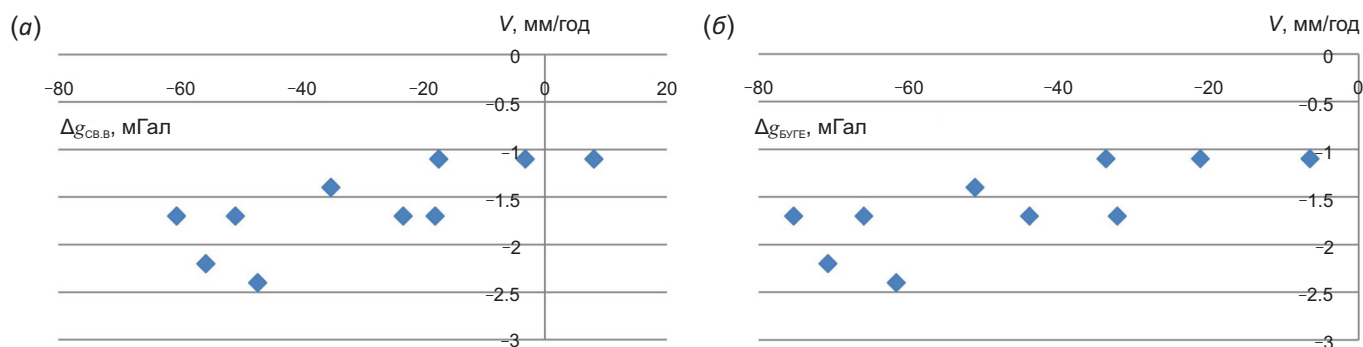


Рис. 4. Связь между скоростью V СВДЗК и аномалиями ускорения силы тяжести в свободном воздухе (а) и в редукции Буге (б) для Припятского прогиба.

Fig. 4. Relationships between modern vertical movement velocities, V and gravity acceleration anomalies in free air (а) and Bouguer reduction (б) for the Pripyat trough.

Таблица 3. Корреляционные связи V с h (м) для тектонических структур Беларуси

Table 3. Correlation relationships between V and h (m) for the tectonic structures of Belarus

Наименование структуры	Уравнение регрессии	R	R^2	σ_R	ε , мм	$\frac{\varepsilon}{V} \cdot 100\%$
Оршанская впадина	$V = -19.684 + 0.1691h - 0.00035h^2$	0.94	0.89	0.04	0.23	($\approx 20-30\%$)
Припятский прогиб	$V = -19.3 + 0.228h - 0.00072h^2$	0.58	0.34	0.21	0.35	($\approx 20-40\%$)
Полесская седловина	$V = -126.188 + 1.5577h - 0.0048h^2$	0.69	0.47	0.22	0.70	($\approx 40-60\%$)
Подляско-Брестская впадина	$V = 95.889 - 1.325h + 0.0045h^2$	0.66	0.44	0.23	0.44	($\approx 20-40\%$)
Белорусская антеклиз	$V = -4.451 - 0.0264h + 0.00005h^2$	0.34	0.11	0.22	0.70	($\approx 30-70\%$)

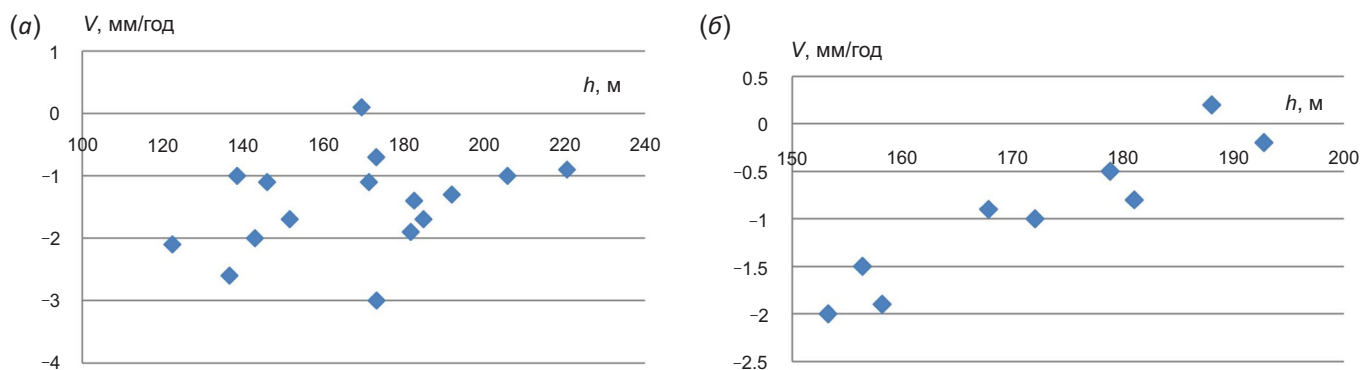


Рис. 5. Связь скоростей V СВДЗК с рельефом дневной поверхности h для Белорусской антеклизы (а) и Оршанской впадины (б).

Fig. 5. Relationships between modern vertical movement velocities, V and the surface relief, h for the Belarusian antecline (а) and the Orsha depression (б).

Таблица 4. Корреляционные связи V с $H_{\text{МОХО}}$ (км) для тектонических структур Беларуси

Table 4. Correlation relationships between V and $H_{\text{МОХО}}$ (km) for the tectonic structures of Belarus

Наименование структуры	Уравнение регрессии	R	R^2	σ_R	ε , мм	$\frac{\varepsilon}{V} \cdot 100\%$
Оршанская впадина	$V = 64.841 - 2.699H_{\text{МОХО}} + 0.027528H_{\text{МОХО}}^2$	0.70	0.48	0.17	0.49	($\approx 30-50\%$)
Припятский прогиб	$V = -69.368 + 2.722H_{\text{МОХО}} - 0.0273H_{\text{МОХО}}^2$	0.47	0.22	0.25	0.37	($\approx 20-40\%$)
Полесская седловина	$V = -288.839 + 12.455H_{\text{МОХО}} - 0.1346H_{\text{МОХО}}^2$	0.77	0.59	0.17	0.83	($\approx 50-70\%$)
Подляско-Брестская впадина	$V = 144.209 - 6.338H_{\text{МОХО}} + 0.069H_{\text{МОХО}}^2$	0.73	0.53	0.19	0.40	($\approx 20-40\%$)
Белорусская антеклиз	$V = 20.503 - 0.864H_{\text{МОХО}} + 0.008H_{\text{МОХО}}^2$	0.38	0.14	0.22	0.68	($\approx 30-70\%$)

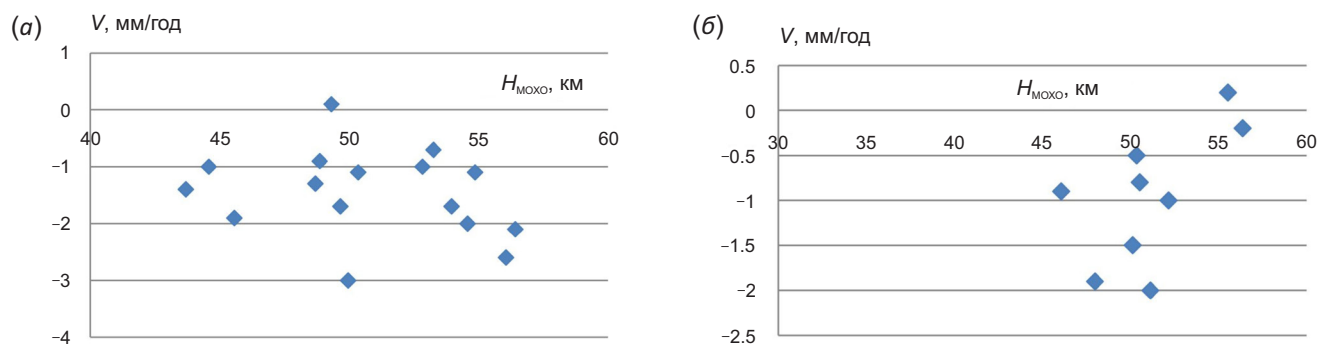


Рис. 6. Связь между скоростью V СВДЗК и мощностью земной коры $H_{\text{МОХО}}$ для Белорусской антеклизы (а) и Оршанской впадины (б).

Fig. 6. Relationships between modern vertical movement velocities, V and crust thickness, $H_{\text{МОХО}}$ for the Belarusian antecline (а) and the Orsha depression (б).

Таблица 5. Корреляционные связи V с ΔT (10^2 нТл) для тектонических структур Беларуси

Table 5. Correlation relationships between V and ΔT (10^2 nT) for the tectonic structures of Belarus

Наименование структуры	Уравнение регрессии	R	R^2	σ_R	ε , мм	$\frac{\varepsilon}{V} \cdot 100\%$
Оршанская впадина	$V = -1.0086 - 0.1967\Delta T + 0.1097\Delta T^2$	0.41	0.17	0.28	0.62	($\approx 40-60\%$)
Припятский прогиб	$V = -1.781 + 0.0209\Delta T + 0.0252\Delta T^2$	0.25	0.06	0.30	0.40	($\approx 20-40\%$)
Полесская седловина	$V = -2.53 - 0.2683\Delta T + 0.793\Delta T^2$	0.77	0.59	0.17	0.83	($\approx 50-70\%$)
Подляско-Брестская впадина	$V = -3.298 + 2.186\Delta T - 0.5723\Delta T^2$	0.58	0.33	0.27	0.48	($\approx 30-50\%$)
Белорусская антеклиза	$V = -1.8098 + 0.045\Delta T + 0.009\Delta T^2$	0.10	0.01	0.25	0.74	($\approx 40-80\%$)

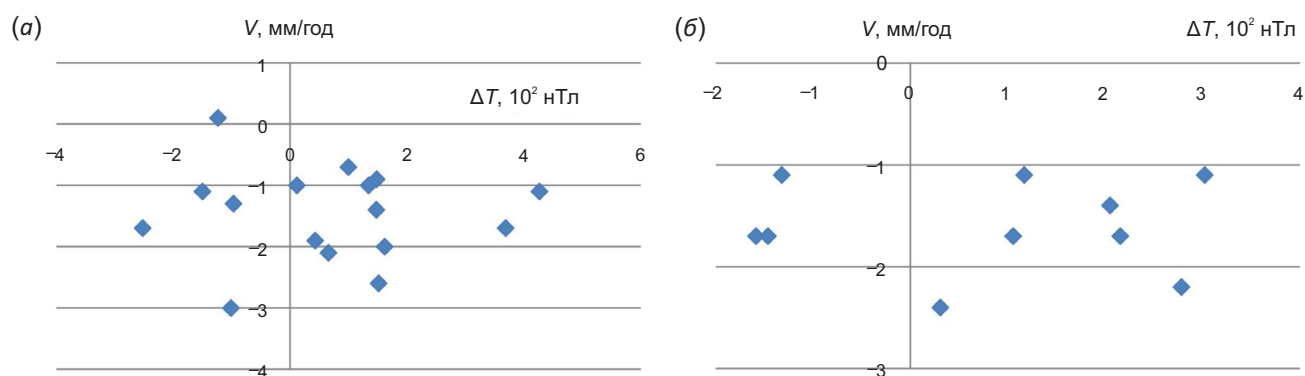


Рис. 7. Связь между скоростью V СВДЗК и магнитными аномалиями ΔT для Белорусской антеклизы (а) и Припятского прогиба (б).

Fig. 7. Relationships between modern vertical movement velocities, V and magnetic anomalies, ΔT for the Belarusian antecline (а) and the Pripjat trough (б).

Следует отметить, что введение C_3 -классификации позволило повысить значение корреляционных соотношений для структур Белорусской антеклизы до уровня коэффициентов корреляции структур из C_2 -классификации. Так же как и в C_2 -классификации, для представленных структур Белорусской антеклизы отмечается невысокая корреляционная связь между параметрами V и ΔT .

Окончательным этапом исследования стало привлечение всех перечисленных ранее параметров для прогнозирования скоростей СВДЗК (табл. 6). Выбор

данного набора параметров наиболее полно соответствует природе геодинамических процессов, которая, в свою очередь, сопровождается деформациями земной коры, изменением геофизических полей, корреляцией с рельефом и внутренним строением Земли. Выбор вида аномалий ускорения силы тяжести ($\Delta g_{\text{СВ,В}}$ или $\Delta g_{\text{БУГЕ}}$) для обобщенных корреляционных уравнений выполнялся на основании анализа величин коэффициентов корреляции R и их средних квадратических погрешностей σ_R в парных уравнениях корреляционных связей.

Таблица 6. Корреляционные связи скоростей V СВДЗК совместно с $\Delta g, h, H_{\text{МОХО}}, \Delta T$ для тектонических структур Беларуси
Table 6. Correlation relationships between V and $\Delta g, h, H_{\text{МОХО}}, \Delta T$ for the tectonic structures of Belarus

Наименование структуры	Уравнение регрессии	R	R^2	σ_R	$\varepsilon, \text{ мм}$	$\frac{\varepsilon}{V} \cdot 100 \%$
Оршанская впадина	$V = -2.48152 + 0.01155\Delta g_{\text{БВГЕ}} + 0.00007\Delta g_{\text{БВГЕ}}^2 + 1.37055 + 0.41057h - 0.00108h^2 + 1.89504 - 1.62217H_{\text{МОХО}} + 0.01608H_{\text{МОХО}}^2 + 0.89504 + 0.12086\Delta T - 0.05972\Delta T^2$	0.96	0.92	0.03	0.18	($\approx 20-30 \%$)
Припятский прогиб	$V = -2.48154 - 0.00103\Delta g_{\text{СВБ}} - 0.00029\Delta g_{\text{СВБ}}^2 + 1.37052 + 0.41504h - 0.00131h^2 + 1.89501 - 1.62254H_{\text{МОХО}} + 0.01875H_{\text{МОХО}}^2 + 0.89501 + 0.11991\Delta T - 0.06114\Delta T^2$	0.86	0.74	0.08	0.34	($\approx 10-30 \%$)
Полесская седловина	$V = -2.48078 - 0.00556\Delta g_{\text{БВГЕ}} + 0.00327\Delta g_{\text{БВГЕ}}^2 + 1.37129 + 0.67501h - 0.00244h^2 + 1.89578 - 1.59846H_{\text{МОХО}} + 0.01113H_{\text{МОХО}}^2 + 0.89578 + 0.15917\Delta T + 0.038\Delta T^2$	0.96	0.92	0.03	0.31	($\approx 20-40 \%$)
Подляско-Брестская впадина	$V = -2.47894 - 0.21798\Delta g_{\text{БВГЕ}} - 0.05488\Delta g_{\text{БВГЕ}}^2 + 1.37313 + 4.39686h - 0.01464h^2 + 1.89761 - 1.44819H_{\text{МОХО}} - 0.09734H_{\text{МОХО}}^2 + 0.89762 + 0.05051\Delta T + 0.01028\Delta T^2$	0.98	0.96	0.02	0.10	($\approx 10-20 \%$)
Вилейский погребенный выступ	$V = -2.52325 - 0.00295\Delta g_{\text{БВГЕ}} - 0.01119\Delta g_{\text{БВГЕ}}^2 + 1.32882 + 0.54715h - 0.0015h^2 + 1.85331 - 2.45556H_{\text{МОХО}} + 0.02952H_{\text{МОХО}}^2 + 0.85332 + 0.7603\Delta T - 0.06921\Delta T^2$	0.96	0.92	0.03	0.23	($\approx 10-20 \%$)
Центрально-Белорусский массив	$V = -2.43714 - 0.30649\Delta g_{\text{СВБ}} + 0.02527\Delta g_{\text{СВБ}}^2 + 1.41493 + 0.30274h - 0.00147h^2 + 1.93942 - 0.34575H_{\text{МОХО}} + 0.0004H_{\text{МОХО}}^2 + 0.93942 - 0.02709\Delta T + 0.16541\Delta T^2$	0.85	0.73	0.10	0.32	($\approx 15-30 \%$)

Определив по способу наименьших квадратов соответствующие коэффициенты для совместно представленных параметров в моделях и сравнивая коэффициенты корреляции, их средние квадратические погрешности, средние квадратические погрешности парных и совместных моделей, можно сделать вывод

о том, что модели, описывающие связь V совместно с $\Delta g, h, H_{\text{МОХО}}, \Delta T$, значительно точнее моделей, описывающих только парные связи.

При помощи уравнений регрессии V совместно с $\Delta g, h, H_{\text{МОХО}}, \Delta T$ для всей территории Республики Беларусь сделан прогноз скоростей СВДЗК (рис. 8). Анализ

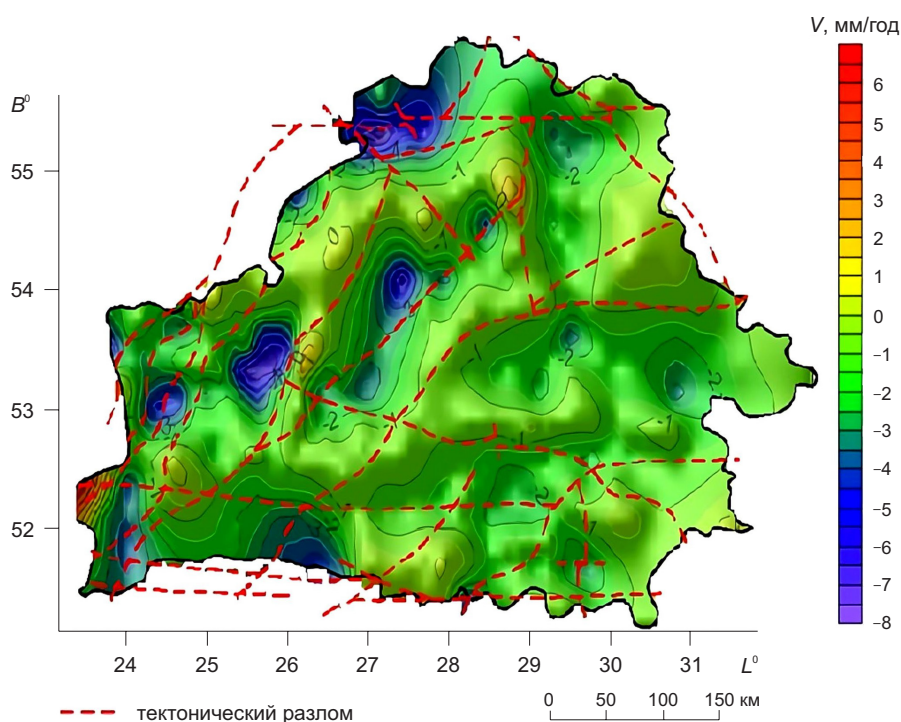


Рис. 8. Модель скоростей СВДЗК, построенная по сетке с шагом $2' \cdot 2'$, с нанесенными на нее основными тектоническими разломами Беларуси (B – геодезическая широта; L – геодезическая долгота; V – скорость СВДЗК).

Fig. 8. Model of modern vertical crustal movement velocities. Grid $2' \cdot 2'$. The main tectonic faults of the territory of Belarus are shown in the grid (B – geodetic latitude; L – geodetic longitude; V – velocity of modern vertical crustal movements).

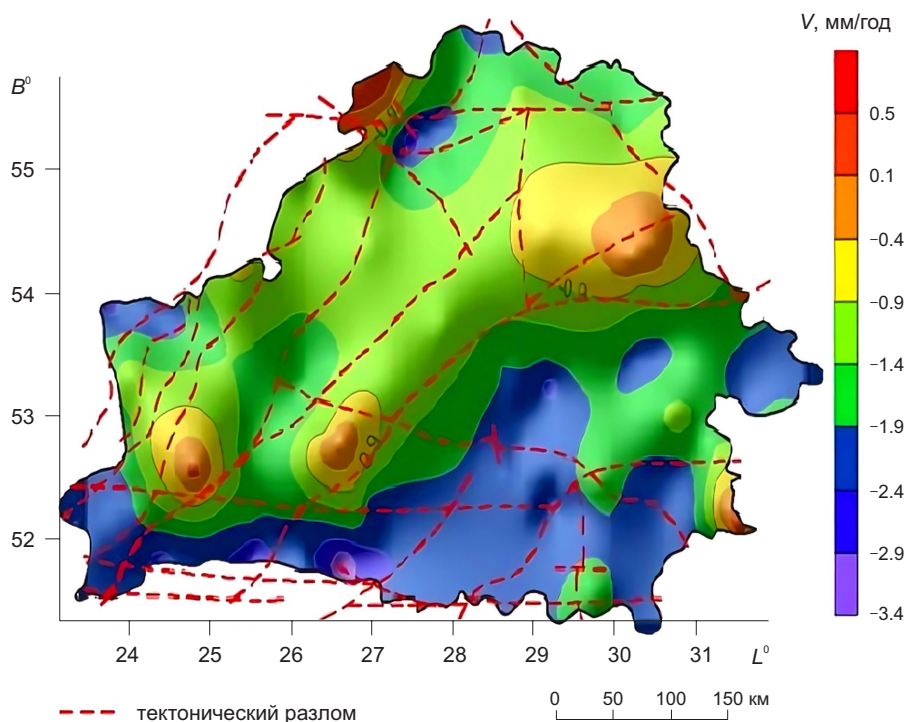


Рис. 9. Сопоставление Карты современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР масштаба 1:5000000 (1989 г.) [Kashin, 1989] с основными тектоническими разломами Беларуси (B – геодезическая широта; L – геодезическая долгота; V – скорость СВДЗК).

Fig. 9. The main tectonic faults of the territory of Belarus shown in the Map of modern vertical movements of the Earth's crust according to geodetic data of the USSR territory (scale of 1:5000000) (1989) [Kashin, 1989] (B – geodetic latitude; L – geodetic longitude; V – velocity of modern vertical crustal movements).

различных методов построения общей модели скоростей СВДЗК территории Беларуси показал наилучшую сходимость модели и эталонных точек при использовании при построении метода интерполяции «Кригинг» (Kriging), оптимизирующего процедуру интерполяции на основе статистической природы поверхности полиномами первого, второго и третьего порядка [Cressie, 1990].

Так как построение модели выполнялось на основании уравнений регрессии (табл. 6), относящихся к отдельным тектоническим структурам, для увязки на их границах и интерполирования в областях, где данные отсутствуют, использован «блочный Кригинг», оценивающий значение свойства на некоторой искомой площади и приписывающий его ячейкам сетки (grid). Перед началом интерполяции подбиралась модель (вариограмма), представляющая собой линию регрессии, построенную при помощи метода наименьших квадратов. Представленная модель в дальнейшем использовалась для интерполяции значений скоростей СВДЗК в искомых ячейках сетки.

Количественная характеристика степени совпадения модельной карты скоростей СВДЗК с эталонными точками показала, что практически все результаты лежат в пределах точности модели (СКП=0.32 мм/год) и наиболее часто встречающиеся разности от -0.4 до $+0.4$ мм/год составляют 87 %.

Опираясь на исследования Р.Е. Айзберга, Р.Г. Гарецкого, А.С. Махнача [Aizberg, 2007; Garetsky, 1976; Makhnach, 2014] и ряда других авторов, можно утверждать, что общей закономерностью для СВДЗК является приуроченность зон высоких градиентов скоростей движений земной коры к тектоническим разломам. На основе этого выполнено сопоставление модельной карты СВДЗК, а также Карты современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР масштаба 1:5000000 [Kashin, 1989] с основными тектоническими разломами Беларуси (рис. 8, 9), характеризующимися, как правило, высокой степенью современной активности и преимущественно вертикальными движениями [Matveev, 2010].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Визуальный анализ расположения тектонических разломов и блоковой структуры земной коры на модельной карте СВДЗК показал хорошую приуроченность зон высоких градиентов скоростей СВДЗК к тектоническим разломам Республики Беларусь. На основе анализа градиентов скоростей СВДЗК модельной карты хорошо выделяются Минский, Докшицкий, Чашницкий, Полоцкий, Пружанский и Островецкий тектонические разломы, что наряду с оценкой точности модельной карты скоростей также является подтверждением корректности построенной модели. Визуальный анализ

Карты современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР масштаба 1:5000000 1989 г. не выявил значительных по величине градиентов скоростей СВДЗК, приуроченных к тектоническим разломам [Kashin, 1989].

Анализируя модельную карту (см. рис. 8), можно отметить, что амплитуда скоростей СВДЗК для территории Беларуси составляет около 14 мм (от +7 мм/год до -7 мм/год). В отдельных районах наблюдаются локальные участки низких скоростей. Данные участки практически полностью расположены на основных тектонических разломах и их пересечении.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно отметить, что представленные в работе уравнения регрессии могут быть использованы для описания связей скоростей современных вертикальных движений земной коры с гравитационным и магнитным полями, мощностью земной коры и рельефом дневной поверхности. В целом для рассматриваемых крупных областей Беларуси использование представленных операторов прогноза СВДЗК, описывающих совместные связи V с Δg , h , $H_{\text{МОХО}}$, ΔT , дает результаты с точностью, вполне приемлемой для построения прогнозных карт скоростей СВДЗК Беларуси. Нужно отметить, что особое внимание следует уделить изменчивости геологического G -фактора. Применение же метода простого линейного интерполирования при прогнозировании скоростей СВДЗК в пространственном аспекте на территориях, состоящих из разновозрастных и разнотипных геоструктурных элементов и обладающих редкой сетью линий повторного нивелирования, не оправдывает себя и заведомо ведет к ошибкам прогнозирования. Прогнозирование скоростей СВДЗК в таком случае должно основываться на установленных закономерностях соотношений и на корреляционных связях между современными вертикальными движениями, геофизическими полями, историей развития и различными элементами геологических структур.

Построенная карта скоростей СВДЗК на территорию Беларуси требует дальнейшего уточнения путем привлечения большего объема информации, покрывающей всю территорию республики, и большей плотности точек, имеющих абсолютные значения скоростей СВДЗК.

4. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор статьи выражает глубокую благодарность главному научному сотруднику Института природопользования Национальной академии наук Беларуси доктору геолого-минералогических наук, профессору Г.И. Каратаеву за ценные советы и рекомендации при проведении исследования и написании статьи.

5. ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Aizberg R.E., 2007. Crustal Faults of Belarus. Krasiko-Print, Minsk, 372 p. (in Russian) [Айзберг Р.Е. Разломы земной коры Беларуси. Минск: Красико-Принт, 2007. 372 с.].

Aizberg R.E., 2013. Synrift Geodynamics of the Pripyat Trough. Belaruskaya Navuka, Minsk, 146 p. (in Russian) [Айзберг Р.Е. Синрифтовая геодинамика Припятского прогиба. Минск: Беларуская навука, 2013. 146 с.].

Astapenko V.N., 2012. The Crust and Mantle of the Territory of Belarus According to Magnetotelluric Data. Ekonompress, Minsk, 208 p. (in Russian) [Астапенко В.Н. Земная кора и мантия территории Беларуси по магнитотеллурическим данным. Минск: Экономпресс, 2012. 208 с.].

Bogdasarov M.A., 2011. Geology and Mineralogy of Quaternary Sediments of the Podlyaska-Brest Depression. Publishing House of BrSU, Brest, 167 p. (in Russian) [Богдасаров М.А. Геология и минералогия четвертичных отложений территории Подляско-Брестской впадины. Брест: Изд-во БрГУ, 2011. 167 с.].

Bulatov V.V., 1990. Depth Geomechanics. Nedra, Moscow, 263 p. (in Russian) [Булатов В.В. Глубинная геомеханика. М.: Недра, 1990. 263 с.].

Cressie N., 1990. The Origins of Kriging. Mathematical Geology 22 (3), 239–252. <https://doi.org/10.1007/BF00889887>.

Donabedov A.T., Sidorov V.A., Timarev K.V., Torkhovskaya L.N., 1960. On the Relationship between the Velocities of Modern Vertical Crustal Movements, Geophysical Fields and Geostructural Elements. Reports of the USSR Academy of Sciences 132 (4), 810–813 (in Russian) [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 // Доклады АН СССР. 1960. Т. 132. № 4. С. 810–813].

Fotiadi E.E., 1970. Baikal Geodynamic Polygon: Research Methodology and the First Results of the Study of Modern Movements of the Earth's Crust. Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Acad. Sci., Novosibirsk, 175 p. (in Russian) [Фотиади Э.Э. Байкальский геодинамический полигон: Методика исследований и первые результаты изучения современных движений земной коры. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1970. 175 с.].

Garetsky R.G. (Ed.), 1976. Tectonics of Belarus. Nauka i Tekhnika, Minsk, 200 p. (in Russian) [Тектоника Белоруссии / Ред. Р.Г. Гарецкий. Минск: Наука и техника, 1976. 200 с.].

Garetsky R.G., 1991. Deep Structure and Dynamics of the Earth's Interior of the Territory of Belarus. Nauka i Tekhnika, Minsk, 316 p. (in Russian) [Гарецкий Р.Г. Глубинное строение и динамика земных недр территории Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1991. 316 с.].

International Centre for Environmental Information, 2019. Available from: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global> (last accessed 12.06.2019).

International Centre for Global Earth Models (ICGEM), 2019. Available from: <http://icgem.gfz-potsdam.de> (last accessed 12.06.2019).

Karataev G.I., 1966. Correlation Scheme of Geological Interpretation of Gravitational and Magnetic Anomalies. Nauka, Novosibirsk, 136 p. (in Russian) [Каратаев Г.И.

Корреляционная схема геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. Новосибирск: Наука, 1966. 136 с.].

Kashin L.A. (Ed.), 1989. Map of Modern Vertical Movements of the Earth's Crust According to Geodetic Data of the USSR Territory. Scale 1:5000000. GUGK, Moscow (in Russian) [Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территории СССР. Масштаб 1:5000000 / Ред. Л.А. Кашин. М.: ГУГК, 1989].

Kolmogorova P.P., Karataev G.I., 1975. Prediction of Velocities of Modern Vertical Crustal Movements Using a Correlation Model According to Static Geological and Geophysical Data. In: E.E. Fotiadi (Ed.), Methodological Problems in Studies of Modern Movements of the Earth's Crust. Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Acad. Sci., Novosibirsk, p. 182–203 (in Russian) [Колмогорова П.П., Каратаев Г.И. Прогнозирование скоростей современных вертикальных движений земной коры с помощью корреляционной модели по статическим геолого-геофизическим данным // Методические вопросы исследования современных движений земной коры / Ред. Э.Э. Фотиади. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1975. С. 182–203].

Kuznetsova V.G., 1973. The Use of Geophysical Data for Mapping Modern Vertical Crustal Movements in the Western Part of Ukraine. In: Modern Movements of the Earth's Crust. Vol. 5. Publishing House of the Estonian SSR Acad. Sci., Tartu, p. 94–100 (in Russian) [Кузнецова В.Г. Использование геофизических данных для составления карты современных вертикальных движений земной коры западной части Украины // Современные движения земной коры. Тарту: Изд-во АН ЭССР, 1973. Вып. 5. С. 94–100].

Makhnach A.A., 2014. Brief Geology of Belarus and Neighbouring Territories. Belarussian Science, Minsk, 190 p. (in Russian) [Махнач А.А. Краткий очерк геологии Беларуси и смежных территорий. Минск: Беларуская навука, 2014. 190 с.].

Makhnach A.A., Garetsky R.G., Matveev A.V. et al. (Eds), 2001. Geology of Belarus. Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 815 p. (in Russian) [Геология Беларуси / Ред. А.А. Махнач, Р.Г. Гарецкий, А.В. Матвеев и др. Минск: Институт геологических наук НАН Беларуси, 2001. 815 с.].

Matveev A.V., 2010. Modern Crustal Movements in the Territory of Belarus. In: E.A. Vysotsky (Ed.), Problems of Regional Geology of Belarus. IV University Geological Readings Dedicated to the 15th Anniversary of the Department of Dynamic Geology and BSU. BSU, Minsk, p. 15–17 (in Russian) [Матвеев А.В. Современные движения земной коры на территории Беларуси // Проблемы региональной геологии Беларуси: IV Университетские геологические чтения, посвященные 15-летию кафедры динамической геологии и БГУ / Ред. Э.А. Высоцкий. Минск: БГУ, 2010. С. 15–17].

Meshcheryakov G.A., Skryl V.A., 1982. The Use of the Collocation Method for Constructing Maps of Modern Vertical Crustal Movements (Case of Sakhalin Island). In: Modern Movements of the Earth's Crust. Abstracts of the VIII All-Union Meeting on Studies of Modern Movements of the Earth's Crust (Kishinev, May 15–17, 1982). Shtiintsa, Kishinev, p. 88 (in Russian) [Мещеряков Г.А., Скрыль В.А. Применение метода коллокации для построения карт современных вертикальных движений земной коры (на примере острова Сахалин) // Современные движения земной коры: Тезисы докладов VIII Всесоюзного совещания по изучению современных движений земной коры (15–17 мая 1982 г., г. Кишинев). Кишинев: Штиинца, 1982. С. 88].

Sharoglazova G.A., 2010. Diagnostics of Modern Crustal Movements in Belarus from the Results of Geodetic, Geological and Geophysical Studies. Polotsk State University, Novopolotsk, 165 p. (in Russian) [Шароглазова Г.А. Диагностика современных движений земной коры Беларуси по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований. Новополоцк: Полоцкий государственный университет, 2010. 165 с.].

Sharoglazova G.A., Korovkin V.N., Vecherskaya E.V., 2009. Comparative Analysis of Existing Maps of Modern Vertical Crustal Movements for the Territory of Belarus. Bulletin of Polotsk State University 12, 142–145 (in Russian) [Шароглазова Г.А., Коровкин В.Н., Вечерская Е.В. Сравнительный анализ существующих карт современных вертикальных движений земной коры для территории Беларуси // Вестник Полоцкого государственного университета. 2009. № 12. С. 142–145].

The Atlas of Belarus, 2002. Belkartografia, Minsk, 292 p. (in Belorussian) [Нацыянальны атлас Беларусі. Минск: Белкартографія, 2002. 292 с.].

KIRYL I. MARKOVICH

Assistant of department
Polotsk State University
29 Blokhin St, Novopolotsk 211440, Republic of Belarus
e-mail: markovich.kirill@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8850-6238

КИРИЛЛ ИГОРЕВИЧ МАРКОВИЧ

ассистент кафедры
Полоцкий государственный университет
211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29, Республика Беларусь