

УДК 551.24:519.233.5(476)

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-30-45

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ СКОРОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ ПО ДАННЫМ РАЗЛИЧНЫХ НАУК О ЗЕМЛЕ

Кирилл Игоревич Маркович

Полоцкий государственный университет, 211440, Республика Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29, магистр технических наук, ассистент кафедры геодезии и геоинформационных систем, тел. (375 29)598-17-60, e-mail: markovich.kirill@mail.ru

В статье представлены исследования, связанные с оценкой возможности применения корреляционной модели прогноза скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) для построения карт скоростей СВДЗК. Представленная методика прогнозирования скоростей СВДЗК основана на аксиоматической корреляционной модели прогноза различных параметров земной коры по гравитационным аномалиям, предложенной Г. И. Каратаевым в 60-е гг. XX в. В настоящей статье подход Г. И. Каратаева впервые апробирован для территории Республики Беларусь с привлечением геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных и построением карты скоростей СВДЗК. Результаты прогнозирования скоростей СВДЗК показали, что использование корреляционной модели прогноза позволяет повысить точность построения карт скоростей СВДЗК и рекомендуется в качестве замены метода линейного интерполирования.

Ключевые слова: корреляционная модель прогноза, современные вертикальные движения земной коры, прогнозирование, уравнения регрессии, данные различных наук о Земле, тектоническое строение.

Введение

Актуальность представленного в статье исследования по применению корреляционной модели прогноза для построения карт скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) заключается в необходимости обеспечения на всех этапах изучения геодинамических процессов многодисциплинарного подхода различных наук о Земле: геодезии, геофизики, геологии, сейсмологии и т. д. Это обусловлено многогранностью проявления данных процессов из-за их сложного единства через взаимосвязанность геофизических полей не только между собой, но и с деформациями земной коры, сейсмичностью, глубинными геолого-тектоническими явлениями.

Общеизвестно, что классическим примером прогнозирования скоростей СВДЗК в пространстве является применение метода простого линейного интерполирования. Попытки использования данного метода для прогнозирования скоростей СВДЗК выполнены в 1956, 1971, 1972, 1986, 1989 гг. путем создания «Карты современных движений земной коры запада Европейской части СССР», «Карты современных движений всей Европейской части СССР и Кавказа», «Карты современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы» [1, 2], «Карты современных вертикальных движений земной коры на тер-

ритории Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Румынии, СССР (Европейская часть)» [3], «Карты современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР масштаба 1 : 5 000 000» [4] соответственно. Существенным недостатком данного метода является отсутствие возможности учета геоморфологических показателей различных территорий в связи с недостаточной плотностью линий повторного геометрического нивелирования.

Поиск решения проблемы прогнозирования скоростей СВДЗК в 70–80-е гг. прошлого столетия способствовал привлечению различных методов математического моделирования: метода средней квадратической коллокации [5–7], рекуррентного прогноза [8, 9], модели авторегрессии и скользящего среднего [9, 10], сингулярно-спектрального разложения [11], Фурье-анализа [12]. Однако данные методы математического моделирования не учитывали комплексную природу геодинамических процессов, сопровождающуюся деформациями земной коры, изменением геофизических полей, корреляцией с рельефом и внутренним строением Земли.

В 60-е гг. XX в. Германом Ивановичем Каратаевым был предложен подход [13], максимально удовлетворяющий комплексности в плане установления эмпирических связей между скоростями СВДЗК и геолого-геофизическими данными. Подход Г. И. Каратаева основан на разработках в области математического моделирования геолого-геофизических явлений и связан с аксиоматической корреляционной моделью прогноза различных параметров земной коры по гравитационным аномалиям. Использование в работе [14] представленного подхода на таких отдельно взятых геологических структурах, как Украинский кристаллический щит, Воронежская антеклиза, Днепровско-Донецкая впадина, Карпаты, Прибайкалье, Забайкалье, Кавказ подтвердило достоверность подхода Г. И. Каратаева к установлению эмпирических связей между скоростями СВДЗК, геодезическими и геофизическими данными.

В данной статье подход Г. И. Каратаева впервые реализован и апробирован для территории Республики Беларусь с использованием появившихся моделей гравитационного поля и рельефа Земли, а также новых магнитометрических, сейсмологических и геолого-тектонических данных с выводом уравнений регрессии и построением карты скоростей СВДЗК.

Методика прогнозирования скоростей современных вертикальных движений земной коры с использованием корреляционной модели прогноза

В рамках данной статьи подход профессора Г. И. Каратаева по прогнозированию скоростей СВДЗК в пространстве апробирован для территории Республики Беларусь. Прогнозирование скоростей СВДЗК выполнено по следующим геодезическим, геолого-геофизическим и сейсмологическим данным: рельеф дневной поверхности h , гравитационное Δg (аномалии ускорения силы тяжести в свободном воздухе $\Delta g_{\text{СВ.В}}$ и в редукции Буге $\Delta g_{\text{БУГЕ}}$) и магнитное по-

ле ΔT (магнитные аномалии), мощность земной коры $H_{\text{МОХО}}$ (поверхность Мохо), тектоническое районирование G . Выбор представленных параметров обусловлен следующими соображениями:

– анализ результатов исследований Г. И. Каратаева, П. П. Колмогоровой, Э. Э. Фотиади, А. Т. Донабедова, В. Г. Кузнецовой [14, 15–18] и других авторов показал, что пространственные изменения СВДЗК обусловлены преимущественно процессами, происходящими в мантии и носящими регионально-блоковый характер. Блоковое распределение скоростей СВДЗК и их соотношений с геофизическими полями связано с изменением мощности блоков земной коры. Таким образом, определенные типы геологических структур имеют различные соотношения мощностей земной коры и как следствие – геофизических полей со скоростями СВДЗК;

– из теории гравиметрии известно и многочисленными исследованиями, приведенными в работах Н. П. Грушинского, С. В. Евсеева, И. Д. Жонголовича, Л. П. Пеллинена, С. А. Ушакова, Э. Э. Фотиади, G. Woollard, W. Heiskanen, W. Kaula и др., установлен факт зависимости аномалий гравитационного поля от рельефа дневной поверхности. Структура мощности земной коры также хорошо отражается в рельефе дневной поверхности. Исходя из этих соображений, вытекает косвенная связь между скоростями СВДЗК и рельефом дневной поверхности, о которой также упоминается в исследованиях Г. И. Каратаева, П. П. Колмогоровой [14].

Математический аппарат, используемый для прогнозирования скоростей СВДЗК, подробно изложен в [14] и заключается в следующем: изучаемая область (территория Республики Беларусь) разбивается на эталонную $R^{\text{Э}}$ и прогнозную $R^{\text{К}}$. В качестве эталонной области выступает совокупность точек с известными значениями скоростей СВДЗК $V^{\text{Э}}$, в качестве прогнозной – точки, в которых требуется найти возможные значения скоростей СВДЗК $V^{\text{К}}$. На всей исследуемой территории задаются геодезические, геолого-геофизические и сейсмологические данные g_p , по которым предполагается прогноз $V^{\text{К}}$. Постулируются следующие положения:

1) если коэффициенты A_1 и A_2 формул связи 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 разделения изучаемой территории на классы $(C_1, C_2, C_3, \dots, C_\varphi)$ по геолого-геофизическим признакам.

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

$$V^\ominus - A_I g^\ominus \leq \varepsilon_0 - \text{связь найдена.} \quad (2)$$

Исходные данные для прогнозирования скоростей современных вертикальных движений земной коры

В качестве эталонной области R^\ominus с известными значениями скоростей СВДЗК V^\ominus выступала «Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР масштаба 1 : 5 000 000» [4], созданная в 1989 г. Главным управлением геодезии и картографии СССР и являющаяся одной из двух имеющихся на данный момент карт скоростей СВДЗК на территорию Беларуси [19]. Территория бывшего СССР, изображенная на данной карте, разделена на области, характеризующиеся различной точностью определения скоростей СВДЗК. Это области, определенные с такими точностями: 0 – $\pm 1,0$ мм/год, $\pm 1,0$ – $\pm 1,5$ мм/год, $\pm 1,5$ – $\pm 2,0$ мм/год, $\pm 2,0$ – $\pm 2,5$ мм/год. Для территории Республики Беларусь (рис. 1) точность определения скоростей СВДЗК составляет $\pm 1,0$ – $\pm 1,5$ мм/год. В качестве заданных значений скоростей СВДЗК V^\ominus использовались скорости реперов, расположенных на карте на линиях нивелирования I и II классов (для территории Республики Беларусь 47 точек), без учета проведенных на карте изолиний.

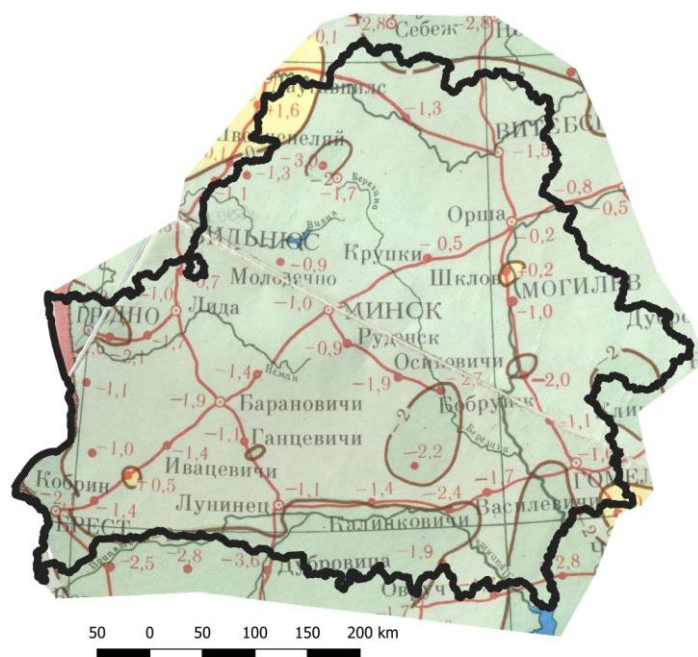


Рис. 1. Фрагмент «Карты современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР масштаба 1 : 5 000 000 (1989 г.)»

На всю исследуемую территорию были заданы:

- аномалии ускорения силы тяжести в свободном воздухе $\Delta g_{\text{СВ.В}}$ и в редукции Буге $\Delta g_{\text{БУГЕ}}$ по данным глобальной гравитационной модели Земли GECO (рис. 2), имеющей полный набор гармонических коэффициентов геопотенциала до 2190-й степени [20];
- рельеф дневной поверхности h по данным глобальной цифровой модели рельефа ETOPO1 (рис. 3), включающей набор топографических данных с пространственным разрешением одна угловая минута [21];
- поверхность Мохо $H_{\text{МОХО}}$, глубина залегания которой и является мощностью земной коры, определялась по «Карте мощности земной коры на территории Беларуси» (рис. 4), составленной Р. Г. Гарецким [22];
- интенсивность магнитного поля Республики Беларусь, несущего в себе картину разломной тектоники, определялась по «Карте магнитных аномалий» (рис. 5), составленной Г. И. Каратаевым, Ж. П. Хотько, Б. В. Бондаренко и др. [22];
- геотектонические особенности исследуемой территории задавались на основании «Карты тектонического районирования Беларуси» (рис. 6), созданной Р. Г. Гарецким [23].

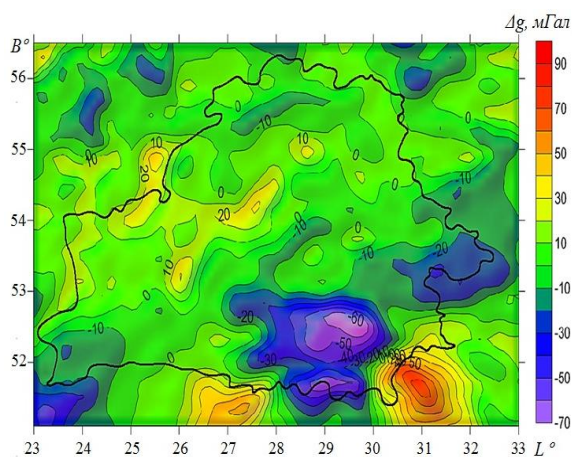


Рис. 2. Аномалии силы тяжести $\Delta g_{\text{СВ.В}}$

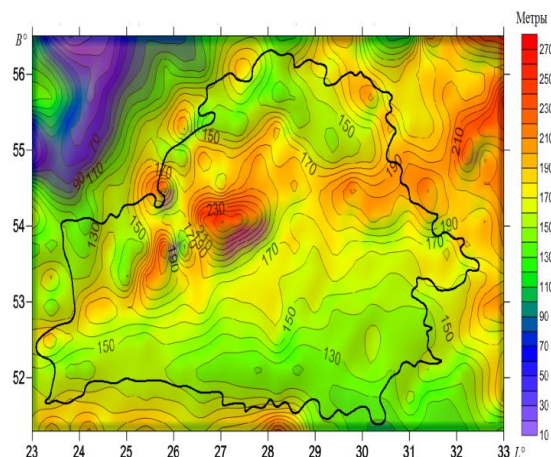


Рис. 3. Рельеф дневной поверхности h

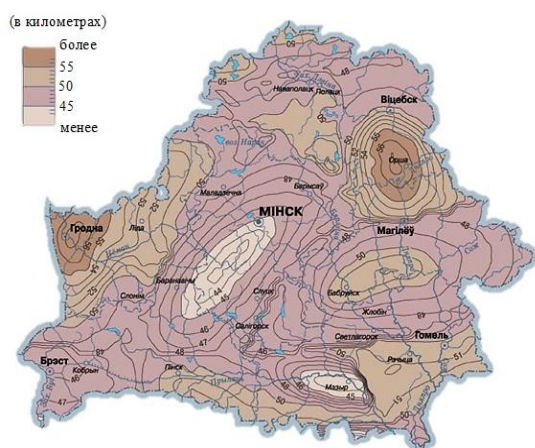


Рис. 4. Мощность земной коры (км)

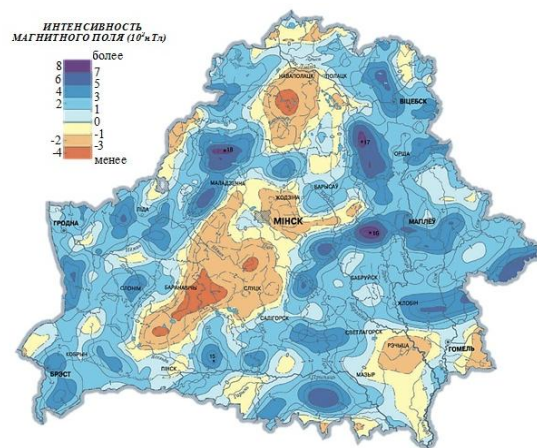


Рис. 5. Магнитные аномалии (нТл)

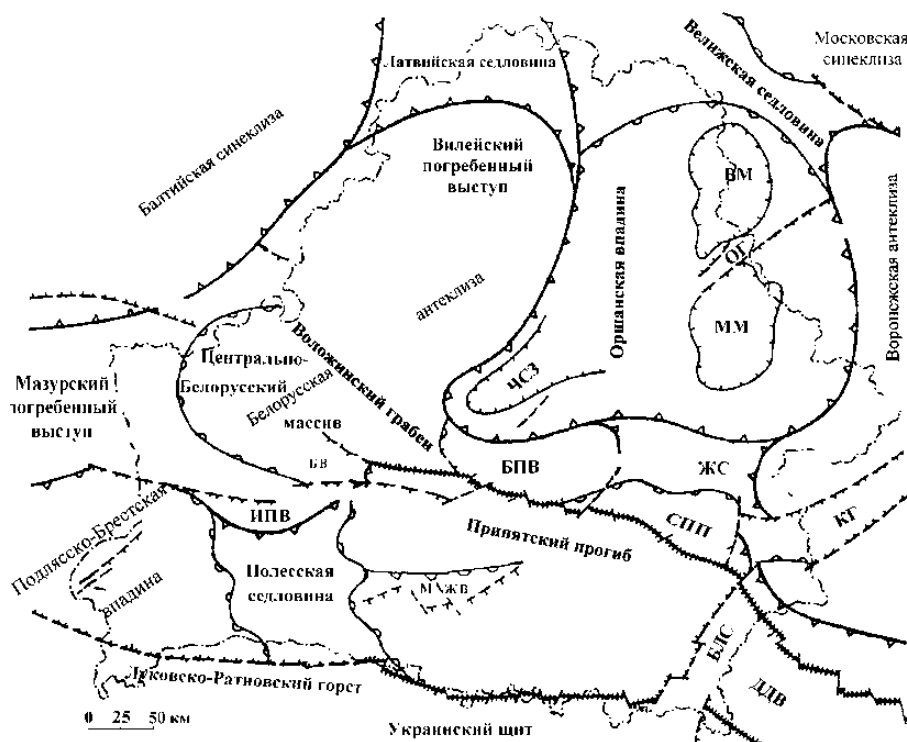


Рис. 6. Карта тектонического районирования территории Республики Беларусь

Полученные результаты

На основании представленного набора данных составлены уравнения следующего типа, в которых с помощью метода наименьших квадратов найдены неизвестные коэффициенты связи:

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

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

Анализ результатов, характеризующих тесноту связи скоростей СВДЗК V с $h, \Delta g_{\text{СВ.В}}, \Delta g_{\text{БУГЕ}}, \Delta T, H_{\text{МОХО}}$ в целом для всей территории Республики Беларусь, показал отсутствие какой-либо значимой связи между перечисленными параметрами в данной C_1 -классификации. Исходя из этого, для поиска корреляционных связей между сопоставляемыми параметрами в соответствии с геотектоническими особенностями выполнено разделение территории Республики Беларусь на основании «Карты тектонического районирования Беларуси» на классы (C_2 -классификация): Оршанская впадина, Припятский прогиб, Полеская седловина, Подляско-Брестская впадина, Белорусская антеклиза.

Использование метода наименьших квадратов для нахождения конкретного вида уравнения регрессии является весьма затруднительным в силу того, что представленные значения геолого-геофизических параметров имеют большое

рассеяние относительно их математических ожиданий. Нахождение конкретного вида зависимости в большинстве случаев является невозможным, а решение системы уравнений при минимизации в общем виде влечет за собой необходимость задания конкретного уравнения регрессии [24, 25].

Таким образом, нахождение вида уравнения регрессии f_i ($i = 1, 2, \dots, \varphi$) в каждом классе осуществлялось методом подбора на основе анализа построенных для каждой отдельной структуры корреляционных графиков, характеризующих связи скоростей СВДЗК с представленными выше геодезическими, геолого-геофизическими и сейсмологическими данными. Использование различных видов функций и детальный анализ графиков корреляции скоростей СВДЗК для всех перечисленных выше структур C_2 -классификации показали, что связь V с $h, \Delta g, H_{\text{МОХО}}, \Delta T$ должна быть криволинейного типа и наилучшим образом определяется при использовании квадратичной функции вида

$$V = \sum_{J=1}^K (a_I + b_I X + c_I X^2), \quad (4)$$

где X – один из геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических параметров;

a, b, c – коэффициенты связи перечисленных ранее параметров со скоростью СВДЗК.

Наличие связи между регрессионной моделью и эталонными значениями скоростей определялось при помощи корреляционного отношения для криволинейной функции [24]

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_E^2}{\sigma_V^2}, \quad (5)$$

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

$\sigma_E^2 = \frac{[(V_I^{\text{мод}} - V_I)^2]}{n}$ – мера необъясненного разброса V относительно модели.

Для значимости коэффициента детерминации R^2 выдвигалась нулевая гипотеза о незначимости исследуемого коэффициента, а затем строилась контрольная статистика F вида

$$F = \frac{R^2(n - m - 1)}{m(1 - R^2)}, \quad (6)$$

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 теоре-

тический 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 коэффициента детерминации опровергается с доверительной вероятностью P .

Средняя квадратическая погрешность коэффициента корреляции определялась с использованием формулы [26]

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

Оценка точности полученных регрессионных моделей выполнена по сходимости модельных скоростей с эталонными скоростями карты СВДЗК СССР, 1989 г.

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

Для всех тектонических структур C_2 -классификации, кроме Белорусской антеклизы, были найдены уравнения регрессии между скоростями СВДЗК и перечисленными ранее параметрами. Наличие слабых связей между скоростями СВДЗК V и h , $\Delta g_{CB,B}$, $\Delta g_{БУГЕ}$, $H_{МОХО}$, ΔT для Белорусской антеклизы потребовало введения C_3 -классификации: Центрально-Белорусский массив, Вилейский погребенный выступ, Бобруйский погребенный выступ, Воложинский грабен, Ивацевичский погребенный выступ, Мазурский погребенный выступ, что позволило повысить значения коэффициентов корреляции структур Белорусской антеклизы до уровня тектонических структур из C_2 -классификации. Парные корреляционные связи скоростей СВДЗК с перечисленными параметрами для одной структуры в виде Припятского прогиба представлены в табл. 1.

Таблица 1

Парные связи скоростей СВДЗК V с h , $\Delta g_{CB,B}$, $\Delta g_{БУГЕ}$, $H_{МОХО}$, ΔT
для Припятского прогиба

Наименование структуры	Уравнение регрессии	R	R^2	$P, \%$	σ_R	$\varepsilon, \text{мм}$	$\frac{\varepsilon}{V} \cdot 100 \%$
Припятский прогиб	$V = -19,3 + 0,228h - 0,00072h^2$	0,58	0,34	0,75	0,21	0,35	($\approx 20-40 \%$)
	$V = -1,151 + 0,01866\Delta g_{CB,B} + 0,000076\Delta g_{CB,B}^2$	0,76	0,57	0,90	0,14	0,28	($\approx 20-30 \%$)
	$V = -0,887 + 0,018\Delta g_{БУГЕ} + 0,000037\Delta g_{БУГЕ}^2$	0,75	0,56	0,90	0,14	0,30	($\approx 20-30 \%$)
	$V = -69,368 + 2,722H_{МОХО} - 0,0273H_{МОХО}^2$	0,47	0,22	0,55	0,25	0,37	($\approx 20-40 \%$)
	$V = -1,781 + 0,0209\Delta T + 0,0252\Delta T^2$	0,25	0,06	0,20	0,30	0,40	($\approx 20-40 \%$)

Для всех перечисленных тектонических структур V с ΔT имеют наиболее слабые корреляционные связи, что объясняется сильной изменчивостью магнитного поля в местах границ региональных блоков в виде разломов [27].

Так как для тектонических структур C_2 - и C_3 -классификаций Республики Беларусь отмечена достаточно тесная корреляционная связь скоростей СВДЗК V с перечисленными параметрами, то исходя из общих соображений можно предполагать значительную корреляционную связь модели, описывающей связь V совместно с $\Delta g, h, H_{\text{МОХО}}, \Delta T$. Окончательный этап исследования состоял в комплексном привлечении всех перечисленных ранее параметров для прогнозирования скоростей СВДЗК (табл. 2). 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 детерминации R^2 , доверительной вероятности P , а также средней квадратической погрешности σ_R в парных уравнениях корреляционных связей.

Таблица 2

Обобщенная корреляционная модель связи скоростей СВДЗК V совместно с $\Delta g, h, H_{\text{МОХО}}, \Delta T$

Наименование структуры	Уравнение регрессии	R	R^2	P	σ_R	$\varepsilon, \text{мм}$	$\frac{\varepsilon}{V} \cdot 100 \%$
Припятский прогиб	$V = -2,481\ 54 - 0,001\ 03\Delta g_{\text{СВ.В}} -$ $- 0,000\ 29\Delta g_{\text{СВ.В}}^2 + 1,370\ 52 +$ $+ 0,415\ 04h - 0,001\ 31h^2 + 1,895\ 01 -$ $- 1,622\ 54H_{\text{МОХО}} + 0,018\ 75H_{\text{МОХО}}^2 +$ $+ 0,895\ 01 + 0,119\ 91\Delta T - 0,061\ 14\Delta T^2$	0,86	0,74	0,97	0,08	0,34	($\approx 10\text{--}30 \%$)

Найдя по способу наименьших квадратов соответствующие коэффициенты для совместно представленных параметров в моделях для всех тектонических структур Республики Беларусь и сравнивая коэффициенты детерминации, их доверительную вероятность, средние квадратические погрешности парных и совместных моделей, можно сделать вывод, что модели, описывающие связь V совместно с $\Delta g, h, H_{\text{МОХО}}, \Delta T$, значительно точнее моделей, описывающих только парные связи V и $\Delta g, V$ и h, V и $H_{\text{МОХО}}, V$ и ΔT .

Так, в целом для представленных структур, таких как Оршанская впадина, прогноз скоростей СВДЗК при помощи обобщенных уравнений регрессии может быть выполнен с ошибкой порядка $\pm 0,2$ мм/год (около 20–30 %), для Припятского прогиба $\pm 0,3$ мм/год (около 10–30 %), для Полесской седловины $\pm 0,3$ мм/год (около 20–40 %), для Подляско-Брестской впадины $\pm 0,1$ мм/год (около 10–20 %), для Вилейского погребенного выступа $\pm 0,2$ мм/год (около 10–20 %), а для Центрально-Белорусского массива $\pm 0,3$ мм/год (около 15–30 %).

При помощи обобщенных уравнений корреляционных связей сделан прогноз скоростей СВДЗК для всех описанных ранее структур Республики Беларусь, который представлен в виде модельной карты скоростей СВДЗК с сечением изолиний через 0,5 мм/год (рис. 7). Исходной для построения карты являлась сетка «Grid» с шагом 2×2 угловые минуты, в узлах которой определены значения скоростей СВДЗК согласно обобщенным корреляционным уравнениям связи. Интерполирование скоростей выполнено с использованием метода интерполяции «Kriging» [28].

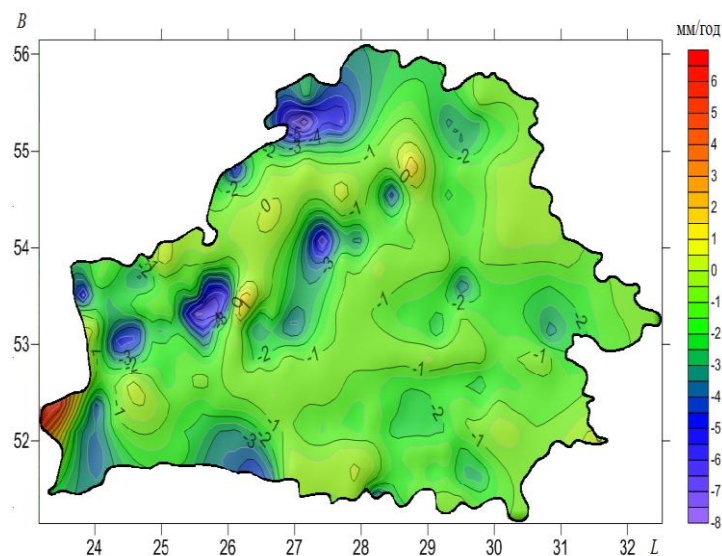


Рис. 7. Модельная карта скоростей СВДЗК территории Республики Беларусь

Степень совпадения модельной карты скоростей СВДЗК с эталонными точками, участвующими при построении модели, представлена в табл. 3 и на рис. 8.

Таблица 3

Количественная характеристика степени сходимости модели скоростей СВДЗК и эталонных точек

Погрешности	Модель СВДЗК в сравнении с эталонными точками
$[\Delta]/n$, мм/год	0,1
+ Δ , max, мм/год	0,9
- Δ , max, мм/год	-0,6
Число разностей (+)	29
Число разностей (-)	18
СКП, мм/год	0,32

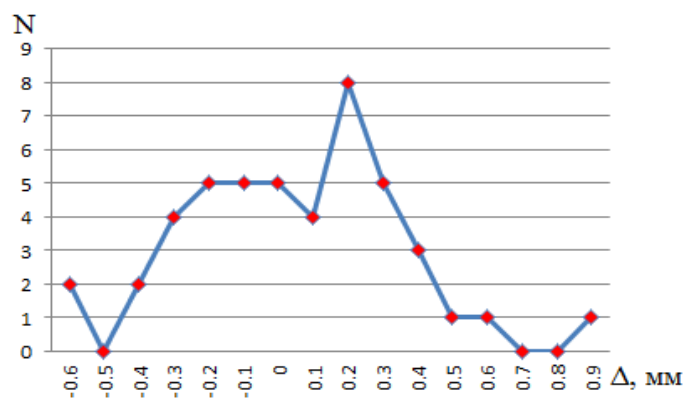


Рис. 8. Вариационная кривая разностей модельных и эталонных значений скоростей СВДЗК

Сопоставление модельных значений СВДЗК с «Картой современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР масштаба 1 : 5 000 000, 1989 г.» показало значительные расхождения скоростей как по величине, так и по направлению. При тщательном рассмотрении зон расхождения скоростей модельной карты и карты ГУГК 1989 г. с подключением схемы тектонических разломов земной коры Республики Беларусь можно отметить, что места расхождения скоростей расположены на основных тектонических разломах и их пересечении. Исходя из того, что общей закономерностью для СВДЗК является приуроченность зон высоких градиентов скоростей движений земной коры к границам региональных блоков в виде разломов [29, 30], выполнено сопоставление модельной карты скоростей СВДЗК (рис. 9) и карты ГУГК 1989 г. с основными тектоническими разломами Республики Беларусь.

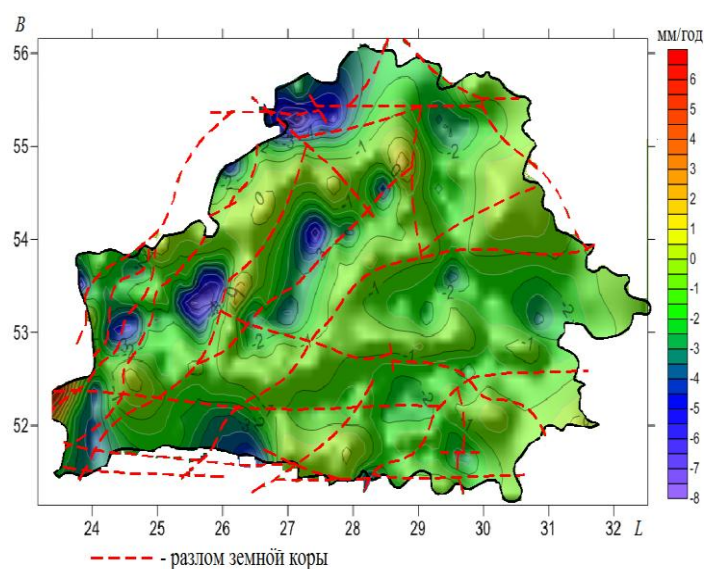


Рис. 9. Сопоставление модельной карты скоростей СВДЗК с основными тектоническими разломами Республики Беларусь

На основе анализа градиентов скоростей СВДЗК модельной карты хорошо выделяются Минский, Докшицкий, Чашникский, Полоцкий, Пружанский и Островецкий разломы. Анализ карты ГУГК 1989 г. не выявил приуроченных к тектоническим разломам значительных градиентов скоростей СВДЗК.

Заключение

Исходя из представленных исследований можно утверждать, что применение корреляционной модели прогноза скоростей СВДЗК по данным различных наук о Земле является весьма перспективным и способствует повышению достоверности построения карт скоростей СВДЗК, особенно на территориях, характеризующихся сложным тектоническим строением и обладающих редкой сетью линий повторного нивелирования, что также подтверждается результатами в работах [13, 14].

Особое внимание при прогнозировании скоростей СВДЗК с использованием корреляционной модели следует уделить правилам разделения изучаемой территории на классы с учетом изменчивости геолого-геофизических признаков. При этом существенное повышение точности построения карт скоростей СВДЗК возможно путем совместного использования набора геодезических, геолого-геофизических и сейсмологических данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буланже Ю. Д., Никонов А. А. Современные движения земной коры // Вестник АН СССР. – 1973. – № 3. – С. 16–32.
2. Кузнецов Ю. Г. Изучение современных вертикальных движений земной поверхности // Гравиметрия и геодезия. – 2010. – С. 299–302.
3. Карта современных вертикальных движений земной коры на территории Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Румынии, СССР (Европейская часть). Масштаб 1 : 10 000 000. – М. : ГУГК, 1986.
4. Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР. Масштаб 1 : 5 000 000. – М. : ГУГК, 1989.
5. Скрыль В. А., Мещеряков Г. А. Применение метода коллокации для построения карт СВДЗК (на примере острова Сахалин) // Современные движения земной коры. – 1982. – С. 72–79.
6. Kanpieser E. Modellierung verticaler krustenbewegungen durch kollokation // Zeitschrift für Vermessungswesen. – 1983. – Bd. 108, No 9. – P. 373–381.
7. Лисовец А. Г., Никонов А. А., Скрыль В. А. Опыт построения карт современных вертикальных движений земной коры побережий Каспийского моря для разных эпох // Геодезия, картография, аэрофотосъемка. – 1986. – № 2. – С. 47–55.
8. Кузнецов Ю. И., Панкрушин В. К. Математическое моделирование и рекуррентная идентификация геодинамических систем на основе механики Гамильтона – Лагранжа // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 3. – С. 3–12.
9. Горшков В. Л. О методах прогнозирования в геодинамике // Известия ГАО РАН. – 2004. – № 217. – С. 365–378.
10. Валеев С. Г., Кавайскова Ю.Е. Смешанные процессы авторегрессии и скользящего среднего для обработки временных рядов // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2006. – № 4. – С. 37–41.

11. Сальникова М. К., Герасименко К. В., Макаренко Я. Н. Анализ эффективности методов спектрального и сингулярного разложения в задачах прогнозирования сигнала с переменной структурой // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2008. – № 2. – С. 137–139.
12. Коровкин В. Н., Соловьев А. Н. Математическое моделирование геодинамических процессов // *Вестник Полоцкого государственного университета.* – 2013. – № 16. – С. 117–121.
13. Каратаев Г. И. Корреляционная схема геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. – Новосибирск : Недра, 1966. – 136 с.
14. 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.* – 1975. – С. 182–203.
15. Фотиади Э. Э. и др. 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.* – 1969. – С. 527–536.
16. К вопросу о соотношениях между скоростями современных вертикальных движений земной коры, геофизическими полями и геоструктурными элементами / А. Т. Донабедов и др. // *Докл. АН СССР.* – 1960. – № 4. – С. 810–813.
17. Кузнецова В. Г. Использование геофизических данных для составления карты современных вертикальных движений Земной коры западной части Украины // *Современные движения Земной коры.* – 1973. – № 5. – С. 94–100.
18. Байкальский геодинамический полигон: Методика исследований и первые результаты изучения современных движений земной коры / Э. Э. Фотиади и др. – Новосибирск : ИГиГ СО АН СССР, 1970. – 175 с.
19. 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.
20. Global Gravity Field Models [Electronic resource]. – Mode of access: <http://icgem.gfz-potsdam.de>.
21. ETOPO1 Global Relief Model [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global>.
22. Нацыянальны атлас Беларусі. – Минск : Белкартографія, 2002. – 292 с.
23. Тектоника Беларуси / ред. Р. Г. Гарецкого. – Минск : Наука и техника, 1976. – 200 с.
24. Булатов В. В. Глубинная геомеханика. – М. : Недра, 1990. – 263 с.
25. Дорогова И. Е., Саркисян А. С. Изучение и моделирование вертикальных движений земной коры в районе действующего вулкана // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.).* – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 123–130.
26. Большаков В. Д., Маркузе Ю. И., Голубев В. В. Уравнивание геодезических построений. – М. : Недра, 1989. – 413 с.
27. Астапенко В. Н. Земная кора и мантия территории Беларуси по магнитотеллурическим данным. – Минск : Экономпресс, 2012. – 208 с.
28. Cressie N. A. C. The Origins of Kriging // *Mathematical Geology.* – 1990. – P. 239–252.
29. Айзберг Р. Е. Разломы земной коры Беларуси. – Минск : Красико-Принт, 2007. – 372 с.
30. Махнач А. А. Краткий очерк геологии Беларуси и смежных территорий. – Минск : Беларуская навука, 2014. – 190 с.

Получено 13.01.2020

© К. И. Маркович, 2020

APPLICATION OF THE CORRELATION FORECAST MODEL FOR CREATION OF THE SPEED MAP OF MODERN VERTICAL MOVEMENTS OF THE EARTH'S CRUST OF THE REPUBLIC OF BELARUS ACCORDING TO DATA FROM VARIOUS EARTH SCIENCES

Kiryl I. Markovich

Polotsk State University, 29, Blochin St., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus, Master of Technical Sciences, Assistant, Department of Geodesy and Geographic Information Systems, phone: (375 29)598-17-60, e-mail: markovich.kirill@mail.ru

The article presents studies related to assessing the possibility of using the correlation model for predicting the velocities of modern vertical movements of the earth's crust to construct velocity maps of modern vertical movements of the earth's crust. The presented methodology for predicting the velocities of modern vertical movements of the earth's crust is based on an axiomatic correlation model for predicting various parameters of the crust based on gravitational anomalies. This methodology was proposed by G. I. Karataev in the 60-s of the twentieth century. In this article, this approach was first tested for the territory of the Republic of Belarus with the use of geodetic, geological and geophysical and seismological data and the construction of a velocity map of modern vertical movements of the earth's crust. The results of predicting the velocities of modern vertical movements of the earth's crust showed that the use of a correlation forecast model can improve the accuracy of constructing velocity maps of modern vertical movements of the earth's crust. The correlation forecast model is recommended as a replacement for the linear interpolation method.

Key words: forecast correlation model, modern vertical movements of the earth's crust, forecasting, regression equations, data from various earth sciences, tectonic structure.

REFERENCES

1. Bulanzhe, Yu. D., & Nikonov, A. A. (1973). *Sovremennye dvizheniya zemnoj kory. Vestnik AN SSSR [Vestnik of the USSR Academy of Sciences]*, 3, 16–32 [in Russian].
2. Kuznecov, Yu. G. (2010). *Izuchenie sovremennyh vertikal'nyh dvizhenij zemnoj poverhnosti. Gravimetriya i geodeziya [Gravimetry and Geodesy]*, 2, 299–302 [in Russian].
3. *Karta sovremennyh vertikal'nyh dvizhenij zemnoj kory na territorii Bolgarii, Vengrii, GDR, Pol'shi, Rumynii, SSSR (Evropejskaya chast'). Masshtab 1 : 10 000 000 [Map of modern vertical movements of the earth's crust in Bulgaria, Hungary, East Germany, Poland, Romania, the USSR (European part). Scale 1 : 10 000 000]*. (1989). Moscow: GUGK Publ. [in Russian].
4. *Karta sovremennyh vertikal'nyh dvizhenij zemnoj kory po geodezicheskim dannym na territoriyu SSSR. Masshtab 1:5 000 000 [Map of modern vertical movements of the earth's crust according to geodetic data on the territory of the USSR. Scale 1 : 5 000 000]*. (1989). Moscow: GUGK Publ. [in Russian].
5. Skryl', V. A., & Meshcheryakov, G. A. (1982). *Primenenie metoda kollokacii dlya postroeniya kart SVDZK (na primere ostrova Sahalin). Sovremennye dvizheniya zemnoj kory [Modern Movements of the Earth's Crust]*, 72–79 [in Russian].
6. Kanpieser, E. (1983). *Modellierung verticaler krustenbewegungen durch kollokation // Zeitschrift für Vermessungswesen*, 9, 373–381 p.
7. Lisovec, A. G., Nikonov, A. A., & Skryl', V. A. (1986). *Experience in constructing maps of modern vertical movements of the earth's crust of the Caspian Sea coasts for different eras. Geodeziya, kartografiya, aerofotos'yomka [Geodesy, Cartography, Aerial Photography]*, 2, 47–55 [in Russian].
8. Kuznecov, Yu. I., & Pankrushin, V. K. (2005). *Mathematical modeling and recurrent identification of geodynamic systems based on Hamilton-Lagrange mechanics. In Sbornik*

materialov GEO-Sibir'-2005: Vol. 3 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2005: International Scientific Conference: Vol. 3] (pp. 3–12). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

9. Gorshkov V. L. (2004). About forecasting methods in geodynamics. *Izvestiya GAO RAN [Proceedings of the Russian Academy of Sciences]*, 217, 365–378 [in Russian].

10. Valeev, S. G., & Kavajskova, Yu. E. (2006). Mixed processes of autoregression and moving average for processing time series. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University]*, 4, 37–41 [in Russian].

11. Sal'nikova, M. K., Gerasimenko, K. V., & Makarenko, Ya. N. (2008). Analysis of the effectiveness of spectral and singular decomposition methods in problems of signal prediction with variable structure. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System Analysis. Modeling]*, 2, 137–139 [in Russian].

12. Korovkin, V. N., & Solov'ev, A. N. (2013). Mathematical modeling of geodynamic processes. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Polotsk State University]*, 1, 117–121 [in Russian].

13. Karataev, G. I. (1966). *Korrelyacionnaya skhema geologicheskoy interpretacii gravitacionnyh i magnitnyh anomalij [Correlation diagram of the geological interpretation of gravitational and magnetic anomalies]*. Novosibirsk: Nedra Publ., 136 p. [in Russian].

14. Kolmogorova, P. P., & Karataev, G. I. (1975). 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 sovremennyh dvizhenij zemnoj kory [Methodological Issues of the Study of Modern Movements of the Earth's Crust]*, 182–203 [in Russian].

15. Fotiadi, E. E., & etc. (1969). Issues of theory and statement of observations of temporary disturbances of gravitational and magnetic fields and movements of the earth's surface in the aspect of modern deep-seated processes. *Problemy sovremennyh dvizhenij zemnoj kory [Problems of Modern Movements of the Earth's Crust]*, 527–536 [in Russian].

16. Donabedov, A. T., & etc. (1960). On the relationship between the speeds of modern vertical movements of the earth's crust, geophysical fields and geostructural elements. *Dokl. AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 4, 810–813 [in Russian].

17. Kuznecova, B. G. (1973). Use of geophysical data for mapping modern vertical movements of the Earth's crust in the western part of Ukraine. *Covremennye dvizheniya Zemnoj kory [Modern Movements of the Earth's Crust]*, 5, 94–100 [in Russian].

18. Fotiadi, E. E., & etc. (1970). *Bajkal'skij geodinamicheskij poligon: Metodika issledovanij i pervye rezul'taty izucheniya sovremennyh dvizhenij zemnoj kory [Baikal geodynamic test site: Research methodology and the first results of the study of modern movements of the earth's crust]*. Novosibirsk: IGI SO AN SSSR Publ., 175 p. [in Russian].

19. Sharoglavova, G. A., Korovkin, V. N., & Vecherskaya, E. V. (2009). Comparative analysis of existing maps of modern vertical movements of the earth's crust for the territory of Belarus. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Polotsk State University]*, 12, 142–145 [in Russian].

20. Global Gravity Field Models. (n. d.). Retrieved <http://icgem.gfz-potsdam.de>.

21. ETOPO1 Global Relief Model. (n. d.). Retrieved <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global>.

22. *Nacyanal'ny atlas Belarusi [National Atlas of Belarus]*. (2002). Minsk: Belkartografiya Publ., 292 p. [in Russian].

23. Gareckij, R. G. (1976). *Tektonika Belarusi [Tectonics of Belarus]*. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 200 p. [in Russian].

24. Bulatov, V. V. (1990). *Glubinnaya geomekhanika [Deep geomechanics]*. Moscow: Nedra Publ., 263 p. [in Russian].

25. Dorogova, I. E., & Sarkisyan, A. S. (2018). Study and modeling of vertical movements of the earth's crust in the area of an active volcano. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2018: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2018: International Scientific Conference: Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 123–130). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
26. Bolshakov, V. D., Markuse, Yu. I., & Golubev, V. V. (1989). *Equalization of geodetic constructions [Adjustment of geodetic constructions]*. Moscow: Nedra Publ., 413 p. [in Russian].
27. Astapenko, V. N. (2012). *Zemnaya kora i mantiya territorii Belarusi po magnitotelluricheskim dannym [Earth's crust and mantle of the territory of Belarus according to magnetotelluric data]*. Minsk: Econompres Publ., 208 p. [in Russian].
28. Cressie, N. A. C. (1990). The Origins of Kriging. *Mathematical Geology*, 239–252 p.
29. Ajzberg, R. E. (2007). *Razlomy zemnoj kory Belarusi [Faults of the Earth's crust of Belarus]*. Minsk: Krasiko-Print Publ., 372 p. [in Russian].
30. Mahnach, A. A. (2014). *Kratkij ocherk geologii Belarusi i smezhnyh territorij [A brief outline of the geology of Belarus and related territories]*. Minsk: Belarusian Science Publ., 190 p. [in Russian].

Received 13.01.2020

© K. I. Markovich, 2020