

УДК 528.22+551.46

К. Р. ТРЕТЯК¹, С. І. ДОСИН^{2*}

¹Кафедра вищої геодезії та астрономії», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013.

^{2*}Кафедра вищої геодезії та астрономії», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, ел. пошта solomiya.dosyn@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ТЕКТОНІЧНИХ БЛОКІВ ЗА ДАНИМИ МАРЕОГРАФІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Мета. Метою виконаного дослідження було проведення реконструкції вертикальних рухів земної кори на території північної частини Європи за даними тривалих мареографічних спостережень; дослідити зміну кінематичних параметрів кристалічних масивів, на якому розташовані відібрані для дослідження мареографи, залежно від вибраної середньої епохи спостережень $t_0 = 1958, 1963, 1968, 1973$ та 1978 роки та періоду усереднення результатів мареографічних спостережень $\Delta t = 60$ років. Априорно прийнято, що кристалічний масив – це жорсткий тектонічний блок з лінійним полем вертикальних швидкостей. **Методика.** Для виконання реконструкції вертикальних рухів земної кори розроблена методика визначення необхідної тривалості мареографічних спостережень для визначення вертикальних рухів із заданою точністю. Крім цього, розроблено алгоритм визначення кінематичних параметрів тектонічного блоку, які характеризують положення лінії нульових швидкостей вертикальних рухів, швидкість зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку α , азимут напрямку зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку β . Визначення цих параметрів виконано методом ітерацій у декілька етапів. Нульове наближення визначає приблизні значення шуканих параметрів, які слугують вихідними даними для виконання першого наближення. Перше наближення – це метод точного розв’язку, який передбачає пошук оптимального просторового положення тектонічного блоку відносно мареографів і їхніх швидкостей. У цьому наближенні також виконується пошук мінімуму функції відхилення моделі руху блоку відносно реальних вимірів мареографів. Розв’язок цієї задачі, а саме пошук мінімуму цільової функції, виконувався градієнтним методом Флетчера–Рівса. Виконання другої ітерації перевіряє збіжність результатів шуканих параметрів та виконує їхню оцінку точності за допомогою методу найменших квадратів. **Результати.** Результатами цього дослідження є: встановлені зміни швидкості руху мареографів залежно від зміни середньої епохи t_0 та періоду усереднення результатів спостережень Δt . Для тектонічних блоків території північної Європи встановлено залежність швидкості зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку α та азимут напрямку зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку β від вибраної середньої епохи $t_0 = 1958, 1963, 1968, 1973$ та 1978 роки та періоду усереднення результатів спостережень $\Delta t = 60$ років. Побудовано просторову кінематичну модель руху тектонічних блоків території північної Європи для $\Delta t = 60$ років. Проаналізовано зміну в часі поля швидкостей вертикальних рухів блоків. Проведено ретроспективний аналіз зміни кінематичних параметрів досліджуваної території. **Наукова новизна.** Отримані результати практично повністю підтверджуються результатами високоточних нівелювань, а систематичні розбіжності з результатами, отриманими за даними ГНСС-спостережень, пов’язані зі зміною висоти геоїда в часі на відповідних територіях. Загалом кінематика тектонічних блоків корелює з неотектонічними рухами, відображеними в геологічних розрізах. **Практична значущість.** За результатами дослідження розроблені теоретичні засади і методика визначення кінематичних параметрів поля швидкостей вертикальних рухів земної кори тектонічних блоків за даними тривалих мареографічних спостережень. Побудовано кінематичну модель поля швидкостей тектонічних блоків території північної Європи. Запропоновану методику можна використати для аналогічного дослідження інших регіонів світового узбережжя, а в разі необхідності – і його окремих частин. За допомогою виконаних досліджень можна проводити реконструкцію в часі вертикальних рухів земної кори для вивчення історичного розвитку ізостатичних процесів та змін гравітаційного поля Землі, а також для дослідження змін висотного положення геодезичних мереж та стійкості систем висот. Вона також дає змогу прогнозувати зміни положення берегової лінії, що значно впливає під час проектування та будівництва гідротехнічних споруд на прибережних територіях. Окрім цього, ця методика надає можливість виконувати реконструкцію вертикальних рухів земної кори в минулому.

Ключові слова: вертикальний рух земної кори, ГНСС-станції, мареограф, тектонічний блок, реконструкція вертикальних рухів.

Вступ

Повільні підняття і опускання ділянок земної кори мають велике значення в історії Землі: цими рухами створені різноманітні геологічні структури, утворені найголовніші нерівності земної поверхні. Аналіз характеру сучасних деформацій земної поверхні дає ключ до розуміння природи складних процесів, що відбуваються у верхній мантії і земній корі.

Відомості про повільні рухи земної кори (особливо в тектонічно рухомих сейсмічних областях) стають усе більш необхідними під час створення опорних геодезичних мереж, під час проектування великих довготривалих споруд – портів, каналів, гідроелектростанцій.

На цей час існують різноманітні методи спостережень за рухами земної кори. Їх досліджують за допомогою геодезичних, геофізичних, геоморфологічних і океанографічних методів.

Поява GNSS-станцій надала можливість проведення дослідження вертикальних рухів земної кори з великою точністю. Їхнє просторове розміщення дає змогу здійснювати моніторинг на глобальному і локальному рівнях. Перевагою цього методу є простота і високий ступінь автоматизації виконання вимірювань, висока оперативність вимірів, а також можливість безперервного моніторингу.

Систематичні спостереження за допомогою мареографів та футштоків дають можливість надійно оцінювати зміни рівня морів і рухів берегової лінії континентів. Однак, цей вид досліджень має свою особливість і складність. Вона полягає в тому, що записи мареографів, які фіксують рівень моря, містять дві складові: океанографічну (пов'язану зі змінами в океані) і складову вертикального руху земної кори (оскільки самі прилади розташовані на суші). Ще однією особливістю є те, що мареографи фіксують вертикальне зміщення пункту відносно поверхні геоїда по прямовисній лінії, а GNSS-приймачі – відносно поверхні референс-еліпсоїда по нормалі до нього. Мареографи мають бідне просторове розміщення, будучи розташованими лише на околицях континентів і островах в океані, тоді як GNSS-станції проводять спостереження не тільки на берегових лініях, а й на континентах.

Визначені миттєві швидкості вертикальних рухів земної кори за допомогою мареографічних спостережень різко змінюються в часі і мають низьку точність фіксації положення реального рівня моря. Тому тут доцільно говорити про усереднення результатів, яке дасть можливість відфільтрувати впливи нетектонічної природи. На основі усереднених мареографічних спостережень за певний проміжок часу є можливість визначати повільні рухи земної кори, які мають, як правило, тектонічну природу.

Існує декілька методик визначення параметрів вертикальних рухів земної кори на основі даних рівня моря.

У дослідженні [Bouin M., 2010] автори для визначення вертикального руху берегової лінії світу від величини $1,8 \pm 0,5$ мм/рік віднімали значення відносних трендів рівня моря, отриманих з записів мареографів. Але існують регіони, в яких тренди перевищують глобальне середнє значення рівня моря в 10 разів (наприклад, у західній частині Тихого і східній частині Індійського океанів). Тому такий підхід до визначення вертикальних рухів земної кори не є цілком виправданим.

У роботі [Bindoff N., 2007] автори дослідили середню величину абсолютного глобального зростання рівня моря для XX ст. Вона становить $1,8 \pm 0,5$ мм/рік. Це значення отримане через усереднення записів мареографів, які розташовані вздовж світового узбережжя.

Такою самою методикою користувались [Bingley R., 2001] під час дослідження вертикальних рухів земної кори Великої Британії, але величину глобального середнього зростання рівня моря вважали такою, що дорівнює 1,5 мм/рік.

У зв'язку з розбіжностями виявлення величини середнього зростання рівня моря, дані вертикальних рухів земної кори необхідно порівнювати з результатами ГНС-спостережень та з результатами альтиметричних вимірювань.

Порівняння даних супутникової альтиметрії та даних мареографів, з метою дослідження вертикальних рухів земної кори, подані в дослідженнях [Nerem R., 2002; Kuo C., 2004; Kuo C., 2008]. Але результати альтиметричних вимірювань зазнають впливу десятирічних варіацій рівня моря (таких як, наприклад, Тихоокеанське десятирічне коливання). Для того, щоб це усунути, потрібні тривалі часові серії альтиметричних вимірювань.

Альтиметричні спостереження ведуть лише 20 років. Цієї тривалості зовсім не достатньо для впевненого визначення вертикальних рухів земної кори.

Методика, запропонована [Zervas C., 2013], стосується врахування океанічних «залишків» та індивідуального сезонного циклу станцій. Але не для всіх мареографів Європи наявна база даних значень індивідуального сезонного циклу станцій. Ця база є наповнена значеннями для мареографів Північної та Південної Америки.

У дослідженні [Santamaría-Gómez A., 2014] автори запропонували новий підхід для точного визначення довгоперіодичних вертикальних рухів земної кори. Він полягає у визначенні подвійних різниць довгоперіодичних записів мареографа і короткоперіодичних даних супутникової альтиметрії. Такий підхід унеможливує використання величини абсолютного зростання рівня моря, а завдяки подвійному відніманню альтиметричних швидкостей, авторам вдалося уникнути похибок супутникової альтиметрії, таких як: орбітальна і похибки приповерхневого тиску, запізнення висотоміра.

Методи дистанційного зондування Землі також можна застосовувати під час дослідження вертикальних рухів земної кори. Високоточні фотограмметричні знімки за тривалий проміжок часу дають

можливість відстежувати зміну вертикального положення об'єктів і берегових ліній.

Дослідники [Gaudi C., 2010] виконували реконструкцію вертикальних рухів території кальдери Campi Flegrei (яка знаходиться на південно-західному узбережжі Італії) за результатами геометричного нівелювання, а також за допомогою наземних фотознімків цієї території.

Мета

Метою виконаного дослідження було проведення реконструкції вертикальних рухів земної кори на території північної частини Європи за даними тривалих мареографічних спостережень; дослідити зміну кінематичних параметрів кристалічних масивів, на якому розташовані відібрані для дослідження мареографи, залежно від вибраної середньої епохи спостережень $t_0 = 1958$, 1963, 1968, 1973 та 1978 роки та періоду усереднення результатів мареографічних спостережень $\Delta t = 60$ років.

Методика визначення кінематичних параметрів вертикальних рухів тектонічного блоку

Детальний опис методики визначення кінематичних параметрів вертикальних рухів тектонічного блоку представлено в [Третьак К., 2014].

Ми вважаємо, що кожна група мареографів, яка належить до одного блоку, знаходиться на жорсткій тектонічній плиті.

Апріорно прийнято, що кристалічний масив – це жорсткий тектонічний блок з лінійним полем вертикальних швидкостей.

Зміна нахилу тектонічного блоку характеризується швидкістю зміни максимального кута нахилу α і віссю нульових швидкостей. Положення лінії нульових швидкостей, швидкість

зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку α і азимут напрямку зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку β є кінематичними параметрами тектонічного блоку.

Апробація методики

Вихідними даними для проведення реконструкції вертикальних рухів земної кори слугували часові серії відібраних мареографів. На рис. 1, а зображено приклад безперервних часових рядів спостережень на мареографі Stockholm (Швеція) без розривів у записі даних. Такі мареографи були відібрані для проведення дослідження. На рис. 1, б зображено приклад часових рядів спостережень на мареографі Vardo (Норвегія), які містять розриви в записі даних (рис. 1, б). Мареографи зі схожими часовими серіями не були відібрані для проведення дослідження. Вихідними даними для побудови графіків є середньомісячні значення рівня моря, взяті зі сайту PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level).

Ще одним критерієм під час відбору мареографів була збіжність результатів, а саме: результати визначення вертикальних рухів земної кори за допомогою відібраних мареографів повинні збігатися з результатами визначення вертикальних рухів земної кори за допомогою ГНСС-станцій, розташованих неподалік (Третьак, Dosun, 2014). Якщо поблизу мареографа немає близько розташованої ГНСС-станції, але його часова серія є за динамікою подібна до часової серії сусіднього з ним мареографа (якщо на цьому мареографі результати визначення вертикального руху земної кори за допомогою мареографічних спостережень збігаються з результатами, визначеними за допомогою ГНСС-спостережень), ми також відібрали і його.

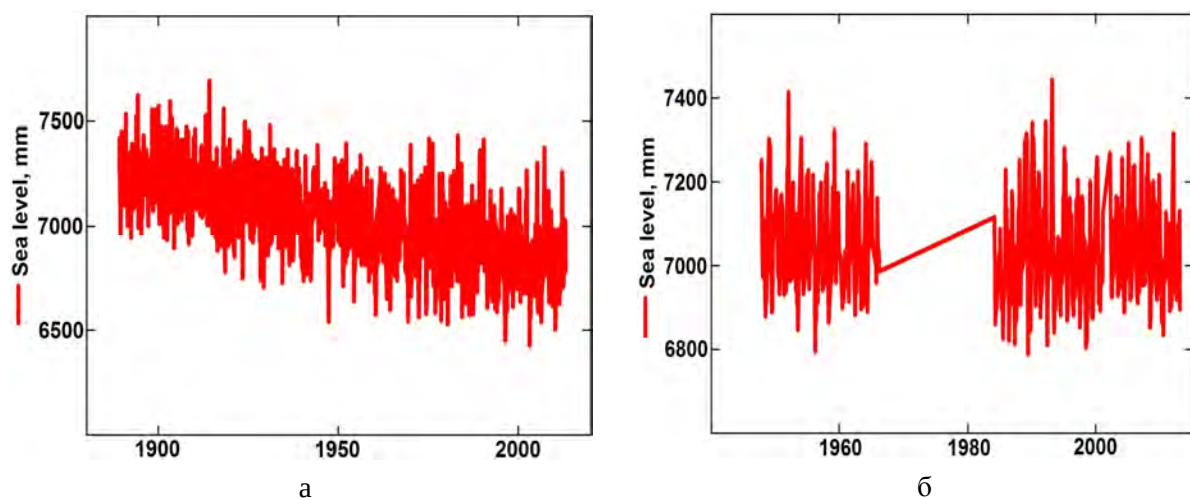


Рис. 1. Приклад безперервної часової серії на мареографі Stockholm (Швеція) (а) та часової серії з перервами у записі даних на мареографі Vardo (Норвегія) (б)

Fig. 1. Example of durative work of tide gauge Stockholm (in Sweden) (a) and time-broken recording data of tide gauge Vardo (in Norway) (b)

Усі відібрані мареографи знаходяться в межах чотирьох блоків (рис. 2) згідно з тектонічним районуванням території Європи. Ці плити були створені в різні геологічні періоди і ми припускаємо, що вони мають різну кінематику.

Ми вважаємо, що кожна група мареографів, яка належить до одного блоку, знаходиться на жорсткій тектонічній плиті.

Апріорно прийнято, що кристалічний масив – це жорсткий тектонічний блок з лінійним полем вертикальних швидкостей.

Як видно з аналізу рис. 2, жоден з мареографів, які розташовані на території Англії та Ірландії не був відібраний. Причинами цього є незначна тривалість часових серій на мареографах, відсутність поблизу розташованих ГНСС-станцій (для перевірки збіжності результатів визначення вертикальних рухів земної кори за допомогою мареографічних та ГНСС-спостережень) та розриви у записах даних.

Для території Європи є розроблена методика [Третяк К., 2014] визначення необхідної тривалості мареографічних спостережень для досягнення точності 0,3 мм/рік визначення вертикальних рухів земної кори.

Проведемо реконструкцію вертикальних рухів земної кори за даними мареографічних спостережень для північної частини Європи, а саме для території, яка охоплює територію Норвегії, Швеції, Фінляндії, Естонії, Латвії, Литви, Польщі, Німеччини, Данії та Нідерландів (рис. 2). Римськими

цифрами позначено тектонічні блоки, для яких виконувалася реконструкція вертикальних рухів земної кори і в межах яких були відібрані мареографи.

Для ілюстрації визначення кінематичних параметрів у табл. 1 наведено вихідні дані за результатами періоду усереднення мареографічних спостережень $\Delta t = 60$ років на середню епоху $t_0 = 1970$ рік для всіх досліджуваних мареографів.

Ми встановили, що середня швидкість руху мареографів на території Європи за абсолютною величиною без врахування напрямку руху становить 2,56 мм/рік. Але для північної частини території Європи (а саме: території північної Швеції та Фінляндії внаслідок післяльодовикового підняття цієї території) ця швидкість є значно більшою (до 9 мм/рік). Тому в табл. 1 значення $m_{V_{\text{мар}}}$ для тектонічного блоку II досягає значень 0,41–0,44 мм/рік.

Обчислимо зміни кінематичних параметрів (B, L, α, β) тектонічних блоків I, II, III, IV за результатами осереднених результатів спостережень на мареографах, які знаходяться в межах відповідних тектонічних блоків.

Використовуючи формули і перетворення, описані в [Третяк К., 2014], ми отримуємо значення кінематичних параметрів (B, L, α, β) відповідного тектонічного блоку з їхньою оцінкою точності, а також значення середньоквадратичної похибки визначення швидкості мареографів за встановленою моделлю (мм/рік).

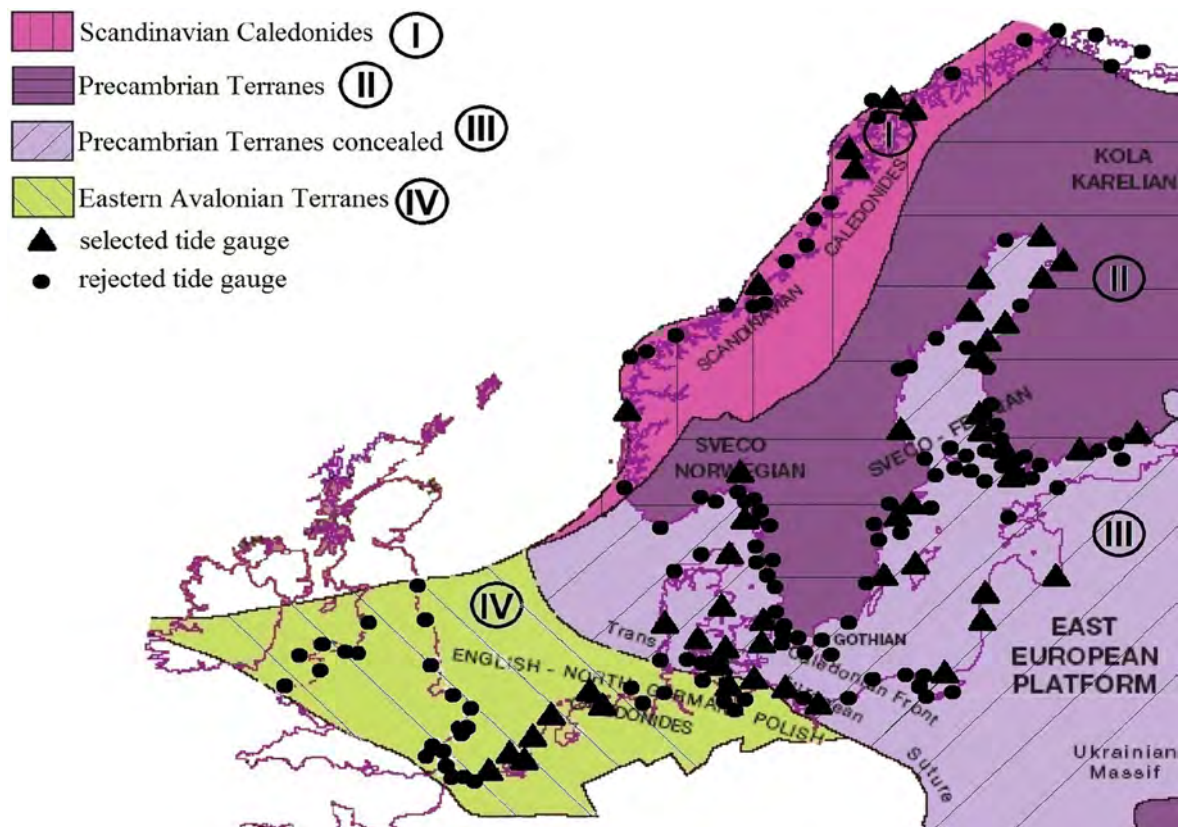


Рис. 2. Тектонічне районування території Європи з позначенням мареографів на ній
Fig. 2. Tectonic zoning designation of European territory with marked tide gauges on

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку кінематичних параметрів тектонічних блоків I, II, III та IV за результатами періоду усереднення мареографічних спостережень $\Delta t = 60$ років на середню епоху $t_0 = 1970$ рік (початок спостережень – 1940 рік, кінець спостережень – 2000 рік)

Table 1

Output data for calculating kinematic parameters of tectonic blocks I, II, III and IV based on the results of the averaging tide gauge observation period $\Delta t = 60$ years in the middle of the epoch $t_0 = 1970$ (the beginning of the observations in 1940, their ending in 2000)

№	№ мареографа	B, °	L, °	Необхідна тривалість спостережень (роки) для визначення $m_{V_{\text{мар}}} \leq 0,3$	$V_{\text{мар}} \leq 0,3$, мм/рік	$m_{V_{\text{мар}}} \leq 0,3$, мм/рік
Тектонічний блок I						
1	58	60,40	5,32	50	0,20	0,24
2	313	63,43	9,10	56	1,86	0,28
3	62	59,91	10,74	62	3,48	0,32
Тектонічний блок II						
1	179	58,35	11,22	50	1,75	0,25
2	69	57,37	17,10	61	1,17	0,34
3	68	58,74	17,87	61	2,45	0,35
4	78	59,32	18,08	60	3,54	0,35
5	2105	57,64	18,28	62	0,73	0,33
6	88	63,99	20,90	69	7,50	0,41
7	285	62,34	21,22	72	6,67	0,41
8	203	64,92	21,23	71	7,70	0,41
9	172	61,59	21,46	67	5,62	0,39
10	57	63,08	21,57	66	6,99	0,42
11	194	63,71	22,69	71	7,10	0,41
12	240	64,67	24,41	72	6,51	0,42
13	229	65,67	24,52	74	7,07	0,43
14	14	60,15	24,96	68	1,33	0,41
15	79	65,04	25,42	70	6,47	0,43
16	315	60,56	27,18	74	0,96	0,44
Тектонічний блок III						
1	80	55,46	8,44	67	-1,28	0,41
2	81	55,56	9,75	36	-1,03	0,15
3	76	56,15	10,22	42	-0,60	0,19
4	98	55,29	10,83	40	-1,07	0,18
5	113	55,33	11,14	43	-0,79	0,18
6	120	54,57	11,93	48	-1,05	0,21
7	119	56,09	12,46	53	-0,57	0,26
8	82	55,71	12,60	50	-0,71	0,24
9	2	53,92	14,23	54	-1,49	0,28
Тектонічний блок IV						
1	20	51,44	3,60	45	-1,56	0,20
2	22	51,98	4,12	47	-2,75	0,22
3	9	51,92	4,25	47	-2,06	0,22
4	32	52,46	4,56	52	-1,78	0,25
5	23	52,96	4,75	52	-1,81	0,26
6	236	53,36	5,22	55	-0,68	0,30
7	25	53,18	5,41	55	-1,49	0,30

У табл. 2 представлено результати обчислення кінематичних параметрів тектонічних блоків I, II, III та IV способом наближень на середню епоху

$t_0 = 1970$ рік при $\Delta t = 60$ років. Вихідними даними для цього слугували результати, представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати обчислення кінематичних параметрів тектонічних блоків I, II, III та IV способом наближень за результатами періоду усереднення мареографічних спостережень за $\Delta t = 60$ років на середню епоху $t_0 = 1970$ рік

Table 1

The results of calculating kinematic parameters of tectonic blocks I, II, III and IV using approximation method based on the results of average period of tide gauge observations for $\Delta t = 60$ years in the middle epoch $t_0 = 1970$

	Нульове наближення	Перше наближення	Друге наближення
I блок			
B, °	61,24	61,24	61,24±0,43
L, °	5,25	5,19	5,19±0,10
α, "/b>рік	0,0011	0,0023	0,0023±0,0069
β, °	107,1420	96,8020	96,8020±0,0057
С.к.п. визначення швидкості мареографів за встановленою моделлю $m_{V_{\text{мод}}}$, мм/рік			0,0002
II блок			
B, °	57,00	57,00	57,00±0,003
L, °	19,04	19,10	19,13±0,02
α, "/b>рік	0,0021	0,0020	0,0020±0,000036
β, °	193,1899	196,7416	196,7415±0,00006
С.к.п. визначення швидкості мареографів за встановленою моделлю $m_{V_{\text{мод}}}$, мм/рік			0,9446
III блок			
B, °	55,55	55,55	55,55±0,004
L, °	25,07	25,42	25,42±0,03
α, "/b>рік	-0,0009	-0,0009	-0,0009±0,00002
β, °	187,6581	193,5801	193,5801±0,00006
С.к.п. визначення швидкості мареографів за встановленою моделлю $m_{V_{\text{мод}}}$, мм/рік			0,1235
IV блок			
B, °	53,4081	53,4081	53,3114±0,0401
L, °	64,8226	69,2146	69,8295±0,2578
α, "/b>рік	-0,0004	-0,0003	-0,0003±0,00006
β, °	187,8490	194,7846	194,7832±0,0006
С.к.п. визначення швидкості мареографів за встановленою моделлю $m_{V_{\text{мод}}}$, мм/рік			0,6282

З аналізу табл. 2 видно, що для тектонічного блоку I с.к.п. визначення швидкості мареографів за встановленою моделлю є високою (0,0002 мм/рік). Це означає, що узгодження між модельною швидкістю і швидкостями мареографів (табл. 1) є досить високим. Пояснюється це тим, що мареографів є лише 3. Під модельною швидкістю розуміємо швидкість мареографа, визначена за кінцевими параметрами (B, L, α, β) (з результатів другого наближення).

Діапазон швидкостей для II блоку (табл. 1) є досить великим (0,73–7,70 мм/рік). Незважаючи на це, с.к.п. визначення швидкості мареографів за встановленою моделлю (табл. 3) є меншою за 1 мм (0,94 мм/рік). Звичайно, ця величина перевищує точність визначення швидкості мареографів. Це може свідчити про те, що, можливо, цей блок потрібно ще поділити на менші блоки.

У тектонічному блоці III присутні 9 мареографів (табл. 1), але результати вимірів узгоджуються з модельним значенням (яке становить 0,12 мм/рік) краще, ніж точність визначення швидкостей мареографів (які змінюються в межах 0,2–0,4 мм/рік). Це обумовлено тим, що значення

швидкостей усіх мареографів мало змінюються, тобто є в межах від -0,57 до -1,49 мм/рік.

У тектонічному блоці IV с.к.п. визначення швидкості мареографів за встановленою моделлю становить 0,63 мм/рік (табл. 2) за швидкості руху мареографів від -0,68 мм/рік до -2,75 мм/рік (табл. 1), що є достатньо задовільним результатом.

Дослідимо зміну кінематичних параметрів (B, L, α, β) тектонічних блоків I, II, III та IV у часі. Для цього зроблено таке дослідження. Для періоду усереднення результатів мареографічних спостережень $\Delta t = 60$ років змінювалася середня епоха t_0 : з 1945 року до 1983 року (для тектонічного блоку I), з 1914 року до 1982 року (для тектонічного блоку II), з 1919 року до 1983 року (для тектонічного блоку III), з 1930 року до 1983 року (для тектонічного блоку IV) через 1 рік. Фрагмент зміни параметрів (B, L, α, β) з їх оцінкою точності, а також значення с.к.п. визначення швидкості мареографів за встановленою моделлю, $m_{V_{\text{мод}}}$, мм/рік подані в табл. 3.

Таблиця 3

Фрагмент зміни кінематичних параметрів (B, L, α, β) тектонічного блоку I за $\Delta t = 60$ років за період з 1960 по 1965 рік

Table 1

The part of changing kinematic parameters (B, L, α, β) of Tectonic Block I for $\Delta t = 60$ years during 1960 to 1965 years

Тектонічний блок I						
t_0 , рік	1960	1961	1962	1963	1964	1965
B , °	61,2439	61,2439	61,2439	61,2439	60,1533	61,2439
L , °	4,4742	4,7360	4,7114	4,9491	4,2122	4,9686
α , "/рік	0,0022	0,0021	0,0021	0,0021	0,0023	0,0022
β , °	103,0306	101,3914	100,3825	99,8662	119,9613	98,3914
m_B , °	0,2172	0,1758	0,0884	0,0140	0,8011	0,1430
m_L , °	0,1044	0,0736	0,0336	0,2893	0,0759	0,0438
m_α , "/рік	0,0034	0,0027	0,0013	0,0122	0,0037	0,0022
m_β , °	0,0029	0,0023	0,0012	0,0102	0,7424	0,0019
$m_{V_{\text{мод}}}$, мм/рік	0,0003	0,0001	0,0001	0,0003	0,0001	0,0001

Результати зміни параметрів швидкості зміни кута нахилу тектонічного блоку α і азимута напрямку зміни максимального нахилу тектонічного блоку β за $\Delta t = 60$ років для тектонічних блоків I–IV подано на рис. 4. Чорною лінією позначена крива апроксимації.

З аналізу рис. 4 можна зробити висновок, що практично в усіх тектонічних блоках значення азимута напрямку зміни максимального нахилу тектонічного блоку β та швидкість зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку α відносно плавно змінюється.

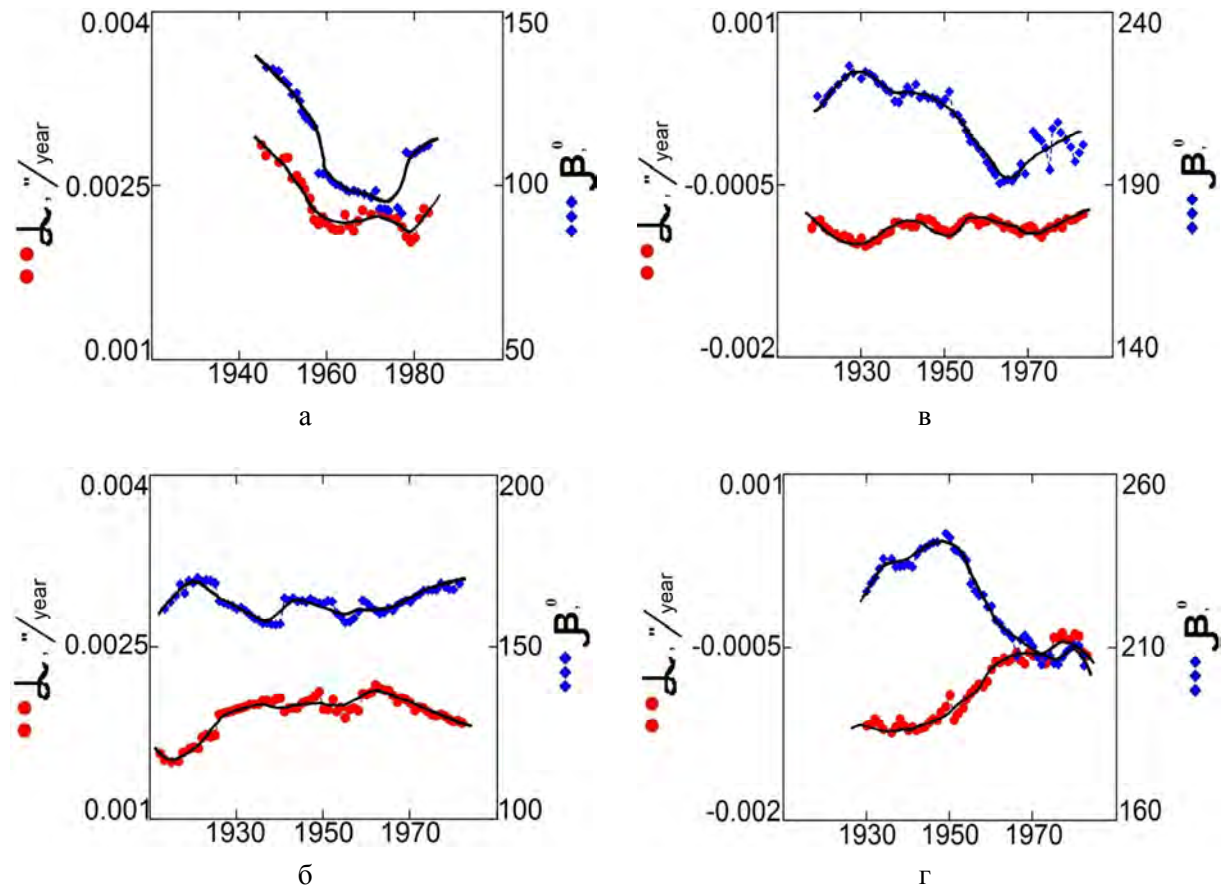


Рис. 3. Зміна параметрів α і β за $\Delta t = 60$ років для тектонічних блоків I (а), II (б), III (в), IV (г)
Fig. 3. Changing parameters α and β when $\Delta t = 60$ for tectonic blocks I (a), II (b), III (c), IV (d)

У зміні азимута напрямку зміни максимального нахилу тектонічного блоку β тектонічного блоку I присутні 2 стрибкоподібні розриви: у 1958 та 1978 році. Вони пов'язані з появою або вилученням нових мареографів, які вносять неоднозначність у розв'язок систем рівнянь. Для цього блоку характерна невелика кількість відібраних для дослідження мареографів (від 3 до 6 мареографів). Тому зміна азимута β є нелінійною. У зв'язку з малою кількістю відібраних мареографів на I тектонічному блоці та коротким періодом спостереження на цих мареографах, спільний період дослідження для всіх чотирьох блоків був скорочений до періоду 1958–1978 роки. Для ілюстрації просторового розподілу швидкостей вертикальних зміщень тектонічних блоків у межах цього періоду виділено середні епохи 1958, 1963, 1968, 1973 та 1987 рік з інтервалом у 5 років.

На рис. 4 наведено результати просторової часової зміни вертикальних рухів земної кори тектонічних блоків I, II, III та IV на середні епохи $t_0 = 1958, 1963, 1968, 1973$ та 1978 рік за результатами осереднення $\Delta t = 60$ років.

З метою візуалізації змін лінійного поля швидкостей вертикальних рухів на рис. 8 наведено

результати їх просторово-часового розподілу, який характеризується кутами α і β .

Для тектонічного блоку I з аналізу рис. 3, а та 4, а можна зробити висновок, що швидкість зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку α зменшується від $+0,0028''/\text{рік}$ до $+0,0020''/\text{рік}$. Інтенсивність рухів зменшується з часом. Азимут напрямку максимального кута нахилу тектонічного блоку β змінюється в південно-східному напрямку (від 144° до 93°). Швидкість підйому тектонічного блоку змінюються в межах від $+0,20$ до $+3,48$ мм/рік (див. табл. 1). Загалом кінематика цього тектонічного блоку характеризується підйомом території зі зміною кута нахилу блоку зі сповільненою швидкістю в часі та його горизонтальним розворотом у південно-східному напрямку. Лінія нульових швидкостей рухається в східному напрямку. Кінематика цього блоку має розбіжності з результатами модельних значень вертикальних швидкостей – модель NKG_RF03vel, [Nørbech T., 2006], (рис. 5), які визначені на підставі GNSS-спостережень. Розбіжності швидкостей вертикальних рухів є практично сталими і сягають ~ 2 мм/рік. Ці розбіжності пояснити підняттям геоїда в північній частині Ботнічної затоки, зміна висоти якого досягає значень 2–4 мм [Owaga R., 2010].

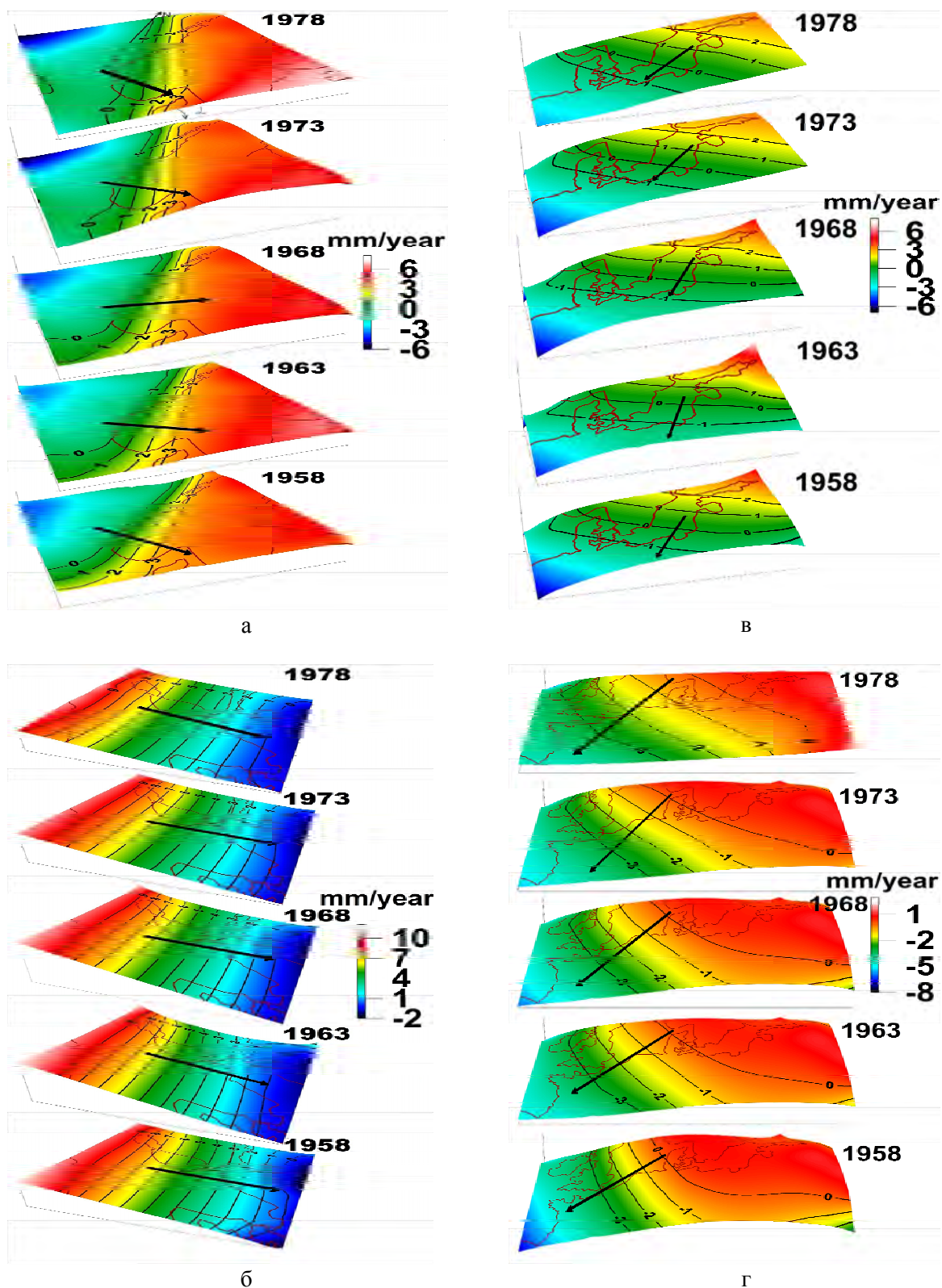


Рис. 4. Просторово-часовий розподіл поля швидкостей вертикальних рухів земної кори тектонічних блоків I (а), II (б), III (в) та IV (г) на досліджуваній території північної Європи на середні епохи $t_0=1958, 1963, 1968, 1973$ та 1978 рік при $\Delta t = 60$ років

Fig. 4. Spatio-temporal distribution of field velocity of vertical crust movements of tectonic blocks I (a), II (b), III (c) and IV (d) (investigated in the northern Europe in middle epoch $t_0 = 1958, 1963, 1968, 1973$ and 1978 for $\Delta t = 60$ years)

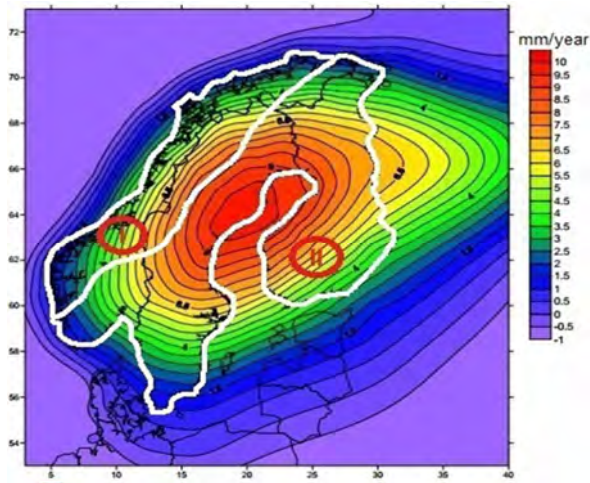


Рис. 5. Модель NKG_RF03vel руху вертикальних швидкостей (мм/рік) [Nørbech T., 2006]

Fig. 5. Model NKG_RF03vel of vertical movement velocity (mm/year) [Nørbech T., 2006]

Для тектонічного блоку II (рис. 3, б, 4, б) швидкість зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку α є додатною і зростає, але починаючи з 1966 року поступово зменшується. Вона змінюється в межах від $+0,0016''/\text{рік}$ до $+0,0022''/\text{рік}$. Інтенсивність рухів до 1966 року зростає, а після 1966 року – навпаки сповільнюється. Азимут напрямку зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку β змінюється в південно-східному напрямку (від 170° до 156°). Швидкість підймання тектонічного блоку змінюється в межах від $+0,73$ до $+7,73$ мм/рік (табл. 1). Загалом кінематика цього тектонічного блоку характеризується підйомом території з зміною кута нахилу блоку зі збільшеною швидкістю в часі. Для цього блоку характерна аналогічна розбіжність з модельними NKG_RF03vel значеннями швидкостей вертикальних рухів земної кори [Nørbech T., 2006], що так само пояснюється підйомом поверхні геоїда на цій території.

Отримані результати для тектонічних блоків I та II практично збігаються з результатами [Perttunen M., 1986], які отримані використанням даних повторного нівелювання та мареографічних спостережень.

Для тектонічного блоку III (рис. 3, в, 4, в) значення швидкості зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку α є від'ємним і хвилюподібно, поступово зменшується в межах від $-0,0013''/\text{рік}$ до $-0,0008''/\text{рік}$. Інтенсивність рухів тектонічного блоку з часом зменшується. Азимут напрямку зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку β змінюється в південно-західному напрямку (від 190° до 232°). Західна частина тектонічного блоку зазнає опускання, а східна

частина – навпаки підймання (табл. 1). Діапазон вертикальних швидкостей змінюється від $-0,57$ до $-1,49$ мм/рік. Загалом, кінематика цього тектонічного блоку описує коливальний рух зі зменшенням швидкості зміни максимального кута нахилу. Аналогічні результати для цього блоку отримали [Oja T., 2014] за даними GNSS-вимірів. Коливальний рух цього блоку узгоджується з неотектонічними рухами, що підтверджується даними аналізу геологічних розрізів і геологічних відкладів досліджуваної території, виконаних різними авторами [Shogenov K., 2013; Popovs K., 2012; Sennikovs J., 2012; Virbulis J., 2013; Vernon R., 2013]. Опускання західної території тектонічного блоку підтверджується результатами опрацювання GNSS-вимірів на території Польщі [Kowalczyk K., 2007; Kowalczyk K., 2012].

Для тектонічного блоку IV (рис. 3, г, 4, г) швидкість зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку α є від'ємною і поступово зменшується в межах від $-0,0013''/\text{рік}$ до $-0,0004''/\text{рік}$. Інтенсивність рухів земної кори з часом спадає. Азимут напрямку зміни максимального нахилу тектонічного блоку β плавно змінюється в південно-західному напрямку (від 203° до 243°). Тектонічний блок зазнавав опускання (табл. 1). Швидкість опускання коливається від $-0,68$ до $-2,75$ мм/рік. Лінія нульових швидкостей рухається в північно-східному напрямку. Загалом кінематика цього тектонічного блоку характеризується опусканням території зі зменшенням швидкості зміни максимального кута нахилу. Згідно з результатами досліджень [Kooi H., 1998], отриманих після проведення серій нівелювання на території Нідерландів, встановлено, що в західному напрямку йде опускання території, а в південно-східному – підйом. Також автори помітили, що вертикальні рухи добре диференціюються з тектонічними структурами цього регіону. Ці результати дослідження збігаються з отриманими нами даними.

Наукова новизна і практичне значення

За результатами дослідження розроблені теоретичні засади і методика визначення кінематичних параметрів лінійного поля швидкостей вертикальних рухів земної кори жорстких тектонічних плит за даними тривалих мареографічних спостережень.

Розроблена методика дає змогу прогнозувати зміну поля швидкостей у часі, що може бути використане під час проектування та будівництва гідротехнічних споруд та під час прогнозування зміни положення берегової лінії територій. Окрім цього, ця методика надає можливість виконувати реконструкцію вертикальних рухів земної кори в минулому.

Побудовано кінематичну модель поля швидкостей тектонічних блоків території північної Європи.

Висновки

За результатами дослідження розроблено теоретичні засади і методику визначення кінематичних параметрів лінійного поля швидкостей вертикальних рухів земної кори умовно жорстких тектонічних плит за даними тривалих мареографічних спостережень. Розроблена методика дає можливість виконувати реконструкцію вертикальних рухів земної кори в минулому і, ймовірно, прогнозувати зміну поля швидкостей у часі. Це можна використати під час проектування та будівництва гідротехнічних споруд та для відтворення і прогнозування зміни положення берегової лінії територій.

За результатами опрацювання мареографічних спостережень побудовано кінематичну модель поля швидкостей умовно виділених тектонічних блоків північної частини території Європи.

Отримані результати практично повністю підтверджуються результатами високоточних нівелювань, а систематичні розбіжності з результатами, отриманими за даними ГНСС-спостережень, пов'язані зі зміною висоти геоїда в часі на відповідних територіях. Загалом кінематика тектонічних блоків корелює з неотектонічними рухами, відображених у геологічних розрізах.

За допомогою виконаних досліджень можна проводити реконструкцію в часі вертикальних рухів земної кори для вивчення історичного розвитку ізостатичних процесів та змін гравітаційного поля Землі, а також для дослідження змін висотного положення геодезичних мереж та стійкості систем висот.

Література

- Bindoff, N. L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J. M., Gulev, S. et al.: 2007, Observations: oceanic climate change and sea level. IPCC Fourth Assessment Report.
- Bingley, R., Dodson, A., Penna, N., Teferle, N., Baker, T.: 2001, Monitoring the vertical land movement component of changes in mean sea level using GPS: results from tide gauges in the UK. *Journal of Geospatial Engineering*, Vol. 3, No. 1, 9–20.
- Bouin, M. N., Wöppelmann, G.: 2010, Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation. *Geophysical Journal International*, 180, 193–209, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04411.x.
- Gaudio, C., Del, Aquino, I., Ricciardi, G.P., Ricco, C., Scandone R.: 2010, Unrest episodes at Campi Flegrei: a reconstruction of vertical ground movements during 1905–2009. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 195, 48–56.
- Kooi, H., Johnston, P., Lambeck, K., Smither, C., Molendijk, R.: 1998, Geological causes of recent (~100 yr) vertical land movement in the Netherlands. *Tectonophysics* 299, 297–316.
- Kowalczyk, K.: 2007, Ruchy pionowe skorupy ziemskiej w Polsce. *Geomatics and Environmental Engineering*. Volume 1, No. 1/1, 157–167.
- Kowalczyk, K., Rapinski, J.: 2012, Adjustment of vertical crustal movement network on the basis of last three leveling campaigns in Poland. *Reports on Geodesy*. Vol. 92, No. 1, 123–134.
- Kuo, C. Y., Shum, C. K., Braun, A., Mitrovica, J. X.: 2004, Vertical crustal motion determined by satellite altimetry and tide gauge data in Fennoscandia. *Geophysical Research Letters*, 31, L01608, doi:10.1029/2003GL019106.
- Kuo, C. Y., Shum, C. K., Braun, A., Cheng, K.-C., Yuchan, Y.: 2008, Vertical Motion Determined Using Satellite Altimetry and Tide Gauges. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 19, No. 1–2, 21–35, April.
- Nerem, R. S., Mitchum, G. T.: 2002, Estimates of vertical crustal motion derived from differences of TOPEX/POSEIDON and tide gauge sea level measurements. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29(19), 1934, doi:10.1029/2002GL015037.
- Nørbech, T. K., Ensager, L. J., Knudsen, P., Koivula, H., Lidberg, M., Ollikainen, M., Weber, M.: 2006, Transformation from a Common Nordic Reference Frame to ETRF89 in Denmark, Finland, Norway, and Sweden. *Proceedings of the 15th General Meeting of the Nordic Geodetic Commission*, May 29 – June 2, 2006, Copenhagen, Denmark. Technical Report No. 1, 2008 National Space Institute, ISBN 10 87-92477-00-3, ISBN 13 978-87-92477-00-2.
- Oja, T., Kollo, K., Pihlak, P.: 2014, The verification of GIA in Estonia using GNSS data. *EGU General Assembly*, September 1–4, 2014, Göteborg, Sweden.
- Owaga, R.: 2010, Transient, seasonal and inter-annual gravity changes from GRACE data: Geophysical modelings. Ph.D. Dissertation, Hokkaido University, Sapporo, Japan.
- Panteleev, A. V., Letova, T. A.: 2005, Optimization methods in examples and problems. Tutorial 2nd ed., Corrected. – Moscow: Publishing House. «High school», – 544, (in Russian).
- Permanent Service for Mean Sea Level [Electronic resource]: PSMSL. Link: <http://www.psmsl.org/>
- Perttunen, M.: 1986, Fennoscandian Land Uplift: Proceedings of a Symposium at Tvärminne, April 10–11, 1986. Arranged by the Finnish National Committee For Quaternary Research. *Geological Survey of Finland, Special Paper* 2.
- Popovs, K., Saks, T., Ukass, J., Jātnieks, J.: 2012, Genetic approach to reconstruct complex regional geological setting of the Baltic basin in 3D geological model. *EGU General Assembly*, 22–27 April, 2012, Vienna, Austria, p.422.
- Santamaría-Gómez, A., Gravelle, M., Wöppelmann, G.: 2014, Long-term vertical land motion from double-differenced tide gauge and satellite altimetry data. *Journal of Geodesy*, Volume 88, Issue 3, 207–222, doi: 10.1007/s00190-013-0677-5.
- Sennikovs, J., Virbulis, J., Bethers, U.: 2012, Geometrical model of the Baltic artesian basin. *EGU General Assembly*, 22–27 April, 2012, Vienna, Austria, p. 5720.

- Shogenov, K., Shogenova, A., Vizika-Kavvadias, O.: 2013, Potential structures for CO₂ geological storage in the Baltic Sea: case study offshore Latvia. Bulletin of the Geological Society of Finland, Vol. 85, 65–81.
- Tretyak, K., Dosyn, S.: 2014, Study of vertical movements of the European crust using tide gauge and GNSS observations. Reports on Geodesy and Geoinformatics, Vol. 97/2014; 112–131 doi: 10.2478/rgg-2014-0016.
- Tretyak, K., Dosyn, S.: 2014, Reconstruction of vertical movements of the Earth's crust, according to tide gauge observations. Geodynamika, Vol. 2(17)/2014; 7–29.
- Vernon, R., O'Neil, N., Pasquali R.: 2013, Screening of prospective sites for geological storage of CO₂ in the Southern Baltic Sea. Espoo 2013. VTT Technology 101. 58 p. +app. 1 p.
- Virbulis, J., Bethers, U., Saks, T., Sennikovs J., Timuhins, A.: 2013, Hydrogeological model of the Baltic Artesian Basin. Hydrogeology Journal. DOI 10.1007/s10040-013-0970-7.
- Zervas, C., Gill, S., Sweet, W.: 2013, Estimating Vertical Land Motion from Long-Term Tide Gauge Records. Technical Report National Ocean Service (NOS) CO-OPS 065, 22 p.

К. Р. ТРЕТЯК¹, С. И. ДОСИН^{2*}

¹Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013

^{2*}Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, ел. почта solomiya.dosyn@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ БЛОКОВ ПО ДАННЫМ МАРЕОГРАФИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Цель. Целью выполненного исследования было проведение реконструкции вертикальных движений земной коры на территории северной части Европы по данным длительных мареографических наблюдений; исследовать изменение кинематических параметров кристаллического массива, на котором расположены отобранные для исследования мареографы, в зависимости от выбранной средней эпохи наблюдений $t_0=1958, 1963, 1968, 1973$ та 1978 года и периода усреднения результатов мареографических наблюдений $\Delta t=60$ лет. Априорно принято, что кристаллический массив представляет жесткий тектонический блок с линейным полем вертикальных скоростей. **Методика.** Для выполнения реконструкции вертикальных движений земной коры разработана методика определения необходимой длительности мареографических наблюдений для определения вертикальных движений с заданной точностью. Кроме этого разработан алгоритм определения кинематических параметров тектонического блока, которые характеризуют положение линии нулевых скоростей вертикальных движений, скорость изменения максимального угла наклона тектонического блока α , азимут направления изменения максимального угла наклона тектонического блока β . Определение этих параметров выполнялся методом итераций в несколько этапов. Нулевое приближение определяет приблизительные значения искомых параметров, которые служат исходными данными для выполнения первого приближения. Первое приближение – это метод точного решения, предусматривающий поиск оптимального пространственного положения тектонического блока относительно мареографов и их скоростей. В этом приближении также выполняется поиск минимума функции отклонения модели движения блока относительно реальных измерений мареографов. Решение этой задачи, а именно поиск минимума целевой функции, выполнялся градиентным методом Флетчера-Ривса. Выполнение второй итерации проверяет сходимость результатов искомых параметров и выполняет их оценку точности с помощью метода наименьших квадратов. **Результаты.** Результатами данного исследования являются: установленные изменения скорости движения мареографа в зависимости от изменения средней эпохи $t_0 = 1958, 1963, 1968, 1973$ та 1978 года и периода усреднения результатов наблюдений $\Delta t = 60$ лет. Для тектонических блоков территории северной Европы установлена зависимость изменения азимута направления изменения максимального угла наклона тектонического блока β и скорости изменения максимального угла наклона тектонического блока α от выбранной средней эпохи t_0 и периода усреднения результатов наблюдений Δt . Построено пространственную кинематическую модель движения тектонических блоков территории северной Европы для $\Delta t=60$ лет. Проанализировано изменение во времени поля скоростей вертикальных движений блоков. Проведен ретроспективный анализ изменения кинематических параметров исследуемой территории. **Научная новизна.** Полученные результаты практически полностью подтверждаются результатами высокоточных нивелирований, а систематические расхождения с результатами, полученными по данным ГНСС-наблюдений, связанные с изменением высоты геоида во времени на соответствующих территориях. В общем, кинематика тектонических блоков коррелирует с неотектоническими движениями, отраженными в геологических разрезах. **Практическая значимость.** По результатам исследования разработаны теоретические основы и методика определения кинематических параметров поля скоростей вертикальных движений земной коры тектонических блоков по данным длительных мареографических наблюдений. Построено кинематическую модель поля скоростей тектонических блоков территории северной Европы. Установленные зависимости кинематических параметров блока служат для дальнейшего углубленного исследования

вертикальных движений земной коры территории Европы в целом, а в случае необходимости - ее отдельных частей. С помощью выполненных исследований можно проводить реконструкцию во времени вертикальных движений земной коры для изучения исторического развития изостатических процессов и изменений гравитационного поля Земли, а также для исследования изменений высотного положения геодезических сетей и устойчивости систем высот. Она также позволяет прогнозировать изменения положения береговой линии, имеет значительное влияние при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений на прибрежных территориях. Кроме этого данная методика позволяет выполнять реконструкцию вертикальных движений земной коры в прошлом.

Ключевые слова: вертикальное движение земной коры, ГНСС-станции, мареограф, тектонический блок, реконструкция вертикальных движений.

K. R. TRETIAK¹, S. I. DOSYN^{2*}

¹Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandera str., Lviv, Ukraine, 79013

^{2*}Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandera str., Lviv, Ukraine, 79013, e-mail solomiya.dosyn@gmail.com

MODELING OF VERTICAL MOVEMENTS OF TECTONIC BLOCKS, ACCORDING TO TIDE GAUGE OBSERVATIONS

Purpose. The purpose of this study: to reconstruct the vertical movements of the earth crust in northern parts of Europe, according to long-term tide gauge observations; to investigate the change of kinematic parameters of the crystalline massif, where the tide gauges, selected for the study, are situated, depending on the average epoch of the observation period $t_0=1958, 1963, 1968, 1973$ та 1978 years and averaging the results of tide gauge observations $\Delta t=60$ years. Priori assumed that the crystalline massifs is a hard tectonic block with linear field of vertical velocity. **Methodology.** To perform the reconstruction of the vertical movements of the earth's crust a method of determining the necessary length of tide gauge observations to determine the vertical movements with given precision is developed. In addition, an algorithm for determining kinematic parameters of the tectonic block, which characterize the position of the line of zero velocity vertical motion, directional azimuth of changing maximum inclination angle of tectonic block β , the velocity of changing maximum inclination angle of tectonic block α is developed. The definition of these parameters was performed by the method of iterations in several stages. Zero approximation determines the approximate values of unknown parameters that serve as input data to perform the first approximation. The first approach is the method of exact solutions, which involves finding the optimal spatial position of the tectonic blocks in relation to tide gauges and their velocities. During this approximation a search for the minimum of a function of the deviation of the motion models of the block relative to the actual measurements of tide gauges is also performed. The solution to this problem, namely the search of the minimum of the objective function, was made by a gradient method of Fletcher-Reeves. The second iteration checks the convergence of the results desired parameters and executes them to evaluate the accuracy using the least squares method. **Results.** The results of this study are: the speed change of tide gauges depending on changes in the average epoch t_0 and the averaging period of observation results Δt is determined. For tectonic blocks of northern Europe territory dependence of change of directional azimuth of changing maximum inclination angle of tectonic block β and the velocity of changing maximum inclination angle of tectonic block α on the average epoch $t_0=1958, 1963, 1968, 1973$ та 1978 and the averaging period of observation results $\Delta t=60$ years is estimated. Spatial kinematic model of motion of a tectonic blocks of northern Europe territory for $\Delta t=60$ years is built. The change in time of the velocity field of the vertical movements of the blocks is analyzed. Retrospective analysis of changes in kinematic parameters of the study area is performed. **Scientific novelty.** The obtained results almost completely are confirmed with results of high accuracy levellings and systematic differences obtained according to GNSS observations are related with changes of geoid height over time on the set territories. In general, tectonic block kinematics is correlated with neo-tectonic movements depicted in geological sections. **Practical significance.** According to the study a theoretical framework and method of determining kinematic parameters of the velocity field of the vertical movements of the crust of tectonic blocks according to long tide gauge observations are developed. Kinematic model of the velocity field of the tectonic blocks of northern Europe territory is built. The dependence of the kinematic parameters of the block will serve for further in-depth study of the vertical movements of the European crust in general, and if necessary of its individual parts. Execution of the research may allow to carry out vertical crust movement reconstruction. It helps to study the historical development of isostatic processes and changes in the Earth gravitational field and to study the position of changing altitude geodetic network and sustainability of its systems. It also allows us to predict changes in position of the coastline, has a significant influence in the design and construction of hydrotechnic structures in coastal areas. In addition, this technique provides the ability to perform the reconstruction of the vertical movements of the crust in the past.

Key words: vertical movement of the earth's crust, GNSS stations, tide-gauge, tectonic block, reconstruction of vertical movements.

REFERENCES

- Bindoff N. L., Willebrand J., Artale V., Cazenave A., Gregory J.M., Gulev S. et al., Observations: oceanic climate change and sea level, IPCC Fourth Assessment Report, 2007.
- Bingley R., Dodson A., Penna N., Teferle N., Baker T., Monitoring the vertical land movement component of changes in mean sea level using GPS: results from tide gauges in the UK, *Journal of Geospatial Engineering*, Vol. 3, No. 1, 9–20, 2001.
- Bouin M. N., Wöppelmann G., Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation, *Geophysical Journal International*, 180, 193–209, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04411.x. 2010.
- Gaudio C. Del, Aquino I., Ricciardi G. P., Ricco C., Scandone R., Unrest episodes at Campi Flegrei: a reconstruction of vertical ground movements during 1905–2009, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 195, 48–56, 2010.
- Kooi H., Johnston P., Lambeck K., Smither C., Molendijk R., Geological causes of recent (~100 yr) vertical land movement in the Netherlands, *Tectonophysics* 299, 297–316, 1998.
- Kowalczyk, K.: 2007, Ruchy pionowe skorupy ziemskiej w Polsce. *Geomatics and Environmental Engineering*, Vol. 1, No. 1/1, 157–167.
- Kowalczyk, K., Rapinski, J.: 2012, Adjustment of vertical crustal movement network on the basis of last three leveling campaigns in Poland. *Reports on Geodesy*. Vol. 92, No. 1, 123–134.
- Kuo C. Y., Shum C. K., Braun A., Mitrovica J. X., Vertical crustal motion determined by satellite altimetry and tide gauge data in Fennoscandia, *Geophysical Research Letters*, 31, L01608, doi:10.1029/2003GL019106. 2004.
- Kuo C. Y., Shum C. K., Braun A., Cheng K.-C., Yuchan Y., Vertical Motion Determined Using Satellite Altimetry and Tide Gauges, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, Vol. 19, No. 1-2, 21-35, April 2008.
- Nerem R. S., Mitchum G.T., Estimates of vertical crustal motion derived from differences of TOPEX/POSEIDON and tide gauge sea level measurements, *Geophysical Research Letters*, Vol. 29(19), 1934, doi:10.1029/2002GL015037, 2002.
- Nørbech T. K., Ensager L. J., Knudsen P., Koivula H., Lidberg M., Ollikainen M., Weber M., Transformation from a Common Nordic Reference Frame to ETRF89 in Denmark, Finland, Norway, and Sweden. *Proceedings of the 15th General Meeting of the Nordic Geodetic Commission*, May 29 – June 2, 2006, Copenhagen, Denmark. Technical Report No. 1, 2008 National Space Institute, ISBN 10 87-92477-00-3 , ISBN 13 978-87-92477-00-2.
- Oja, T., Kollo, K., Pihlak, P.: 2014, The verification of GIA in Estonia using GNSS data. *EGU General Assembly*, September 1–4, 2014, Göteborg, Sweden.
- Owaga, R.: 2010, Transient, seasonal and inter-annual gravity changes from GRACE data: Geophysical modelings. Ph.D. Dissertation, Hokkaido University, Sapporo, Japan.
- Panteleev, A. V., Letova, T. A.: 2005, Optimization methods in examples and problems. Tutorial 2nd ed., Corrected. – Moscow: Publishing House. «High school», – 544, (in Russian).
- Permanent Service for Mean Sea Level [Electronic resource]: PSMSL. Link: <http://www.psmsl.org/>
- Perttunen, M.: 1986, Fennoscandian Land Uplift: Proceedings of a Symposium at Tvärminne, April 10-11, 1986. Arranged by the Finnish National Committee For Quaternary Research. *Geological Survey of Finland*, Special Paper 2.
- Popovs, K., Saks, T., Ukass, J., Jättnieks, J.: 2012, Genetic approach to reconstruct complex regional geological setting of the Baltic basin in 3D geological model. *EGU General Assembly*, 22–27 April, 2012, Vienna, Austria, p. 422.
- Santamaría-Gómez, A., Gravelle, M., Wöppelmann, G.: 2014, Long-term vertical land motion from double-differenced tide gauge and satellite altimetry data. *Journal of Geodesy*, Volume 88, Issue 3, 207–222, doi: 10.1007/s00190-013-0677-5.
- Sennikovs, J., Virbulis, J., Bethers, U.: 2012, Geometrical model of the Baltic artesian basin. *EGU General Assembly*, 22–27 April, 2012, Vienna, Austria, p. 5720.
- Shogenov, K., Shogenova, A., Vizika-Kavvadias, O.: 2013, Potential structures for CO2 geological storage in the Baltic Sea: case study offshore Latvia. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, Vol. 85, 65–81.
- Tretyak, K., Dosyn, S.: 2014, Study of vertical movements of the European crust using tide gauge and GNSS observations. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, Vol. 97/2014; 112–131 doi: 10.2478/rgg-2014-0016.
- Tretyak, K., Dosyn, S.: 2014, Reconstruction of vertical movements of the Earth's crust, according to tide gauge observations. *Geodynamika*, Vol. 2(17)/2014; 7–29.
- Vernon, R., O'Neil, N., Pasquali R.: 2013, Screening of prospective sites for geological storage of CO2 in the Southern Baltic Sea. *Espoo 2013. VTT Technology* 101. 58 p.+app. 1 p.
- Virbulis, J., Bethers, U., Saks, T., Sennikovs J., Timuhins, A.: 2013, Hydrogeological model of the Baltic Artesian Basin. *Hydrogeology Journal*. DOI 10.1007/s10040-013-0970-7.
- Zervas, C., Gill, S., Sweet, W.: 2013, Estimating Vertical Land Motion from Long-Term Tide Gauge Records. Technical Report National Ocean Service (NOS) CO-OPS 065, 22 p.

Надійшла 04.05.2016 p.