

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

Досин Соломія Ігорівна

УДК: 528.481+551.242.12+551.461.24

**ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТЕЙ ВІКОВИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ  
КОРИ ЗА ДАНИМИ МАРЕОГРАФІЧНИХ ТА GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ  
(НА ПРИКЛАДІ ЄВРОПЕЙСЬКОГО КОНТИНЕНТУ)**

05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Третяк Корнелій Романович**,  
директор Інституту геодезії  
Національного університету «Львівська політехніка»,  
м. Львів;

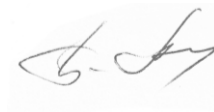
Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Міненко Павло Олександрович**,  
професор кафедри інформатики та прикладної математики  
Криворізького національного університету, м. Кривий Ріг;  
  
кандидат технічних наук  
**Кучер Олег Васильович**,  
перший заступник директора з наукової роботи  
Науково-дослідного інституту геодезії та картографії, м. Київ.

Захист дисертації відбудеться «30» листопада 2017 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С.Бандери, 12, ауд. 502, II навч. корп.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «27» жовтня 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
к.т.н., доц.



Паляниця Б. Б.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Однією з проблем сучасної геодезії є питання визначення і реалізації вертикальної системи відліку. Референсна висотна система характеризується вертикальним нуль-пунктом і висотами, віднесеними до гравітаційного поля Землі. В переважній більшості вертикальні нуль-пункти реалізовані середнім рівнем моря, який визначається на одному чи декількох мареографах шляхом усереднення мареографічних вимірів впродовж тривалого проміжку часу.

Висоти геодезичних пунктів, реперів відраховуються від вертикальних нуль-пунктів і не є сталими в часі. Для горизонтальних рухів вже є розроблені моделі, які розраховують зміни в часі пунктів, розташованих на земній поверхні, а для вертикальних рухів такі моделі тільки починають створювати. Ці моделі потрібні для врахування поправок при урівноваженні мереж нівелювання, при інтерполяції і прогнозуванні нормальних висот геодезичних пунктів, перманентних GNSS-станцій; при вивченні стійкості висотних мереж. Про це свідчать численні резолюції Міжнародної асоціації геодезії (IAG) та її підкомісії EUREF. Комісія IAG спеціально створила проект ICP1.2, основним завданням якого було підготувати пропозиції для визначення та реалізації глобальної вертикальної системи відліку WHS. Для реалізації опорної системи необхідно враховувати просторові рухи земної кори, які умовно розділяють на горизонтальні і вертикальні рухи земної кори (ВРЗК). Умовний їх поділ зумовлений історичним розвитком методів дослідження рухів земної кори.

Усі геодезичні виміри проводяться на земній поверхні, тому одержані результати вимірювань можна інтерпретувати як рух земної поверхні. На підставі узагальнення цих результатів і одержання схожих тенденцій рухів у межах певних територій чи блоків можна говорити про рухи земної кори. ВРЗК – це переміщення точок земної кори у вертикальному напрямку, яке спричинене напружено-деформованим станом літосфери. Вони проявляються на значній за площею ділянці земної поверхні.

Загальноприйнятим та надійним способом визначення горизонтальних і вертикальних рухів земної кори в останні десятиліття є GNSS-вимірювання. Результати таких спостережень широко використовуються в геодинамічних дослідженнях і частково при прогнозах сейсмічної активності.

Особливістю і складністю досліджень вікових ВРЗК за допомогою мареографічних спостережень є те, що записи мареографів, які фіксують рівень моря (відносний), містять дві складові: океанографічну (пов'язану зі змінами в океані) і складову вертикального руху земної кори (оскільки самі прилади розташовані на суші). Мареографи фіксують вертикальне зміщення пункту відносно поверхні геоїда по прямовисній лінії до нього.

Вивчення ВРЗК за допомогою мареографічних спостережень може бути доповнене GNSS-вимірюваннями, незважаючи на те що тривалість часових серій перманентних станцій є меншою, ніж 30 років. Але GNSS-вимірювання мають значно вищу точність визначення висотних зміщень із тривалих часових рядів, ніж

мареографічні спостереження. Перманентні GNSS-станції рівномірно покривають території континентів, а мареографи розташовані тільки вздовж берегових ліній. Вилучаючи періодичні і випадкові зміщення з часових серій GNSS-вимірів і приймаючи лінійну модель вікових вертикальних рухів, можна говорити про спільне опрацювання мареографічних і GNSS-спостережень. Обидва методи дослідження є відносними. Результати опрацювання GNSS-вимірів є більш наближені до визначення абсолютних рухів, ніж мареографічні. Тому метою роботи є поєднання двох незалежних методів – результатів GNSS-спостережень і мареографічних даних з метою дослідження вікових ВРЗК на території Європи та врахуванням всіх чинників, які спотворюють результати вимірювань.

ВРЗК на прибережних територіях нерозривно пов'язані зі зміною рівня моря. Стурбованість із приводу підвищення рівня моря призвела до низки недавніх оглядів і оцінок наукових даних, багато з яких спонсоруються світовими національними та міжнародними агентствами. Щорічні звіти Міжнародної комісії з питань зміни клімату містять детальні та обґрунтовані оцінки стосовно актуального стану Світового океану та клімату Землі. Зростання рівня моря, викликане глобальним потеплінням, і його вплив на прибережні території стали питаннями, до яких прикута все більша увага наукової спільноти, а також мас-медіа та громадськості. Враховуючи науковий, економічний і соціогуманітарний аспекти зазначеної проблематики, можна говорити про те, що такі дослідження є необхідними та актуальними в наш час.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконана робота відповідає науковому напряму кафедри вищої геодезії та астрономії – «Моніторинг фізичної поверхні Землі та її атмосфери на основі аналізу результатів сучасних наземних і супутникових вимірювань»; науковій тематиці робіт галузевої науково-дослідної лабораторії «Геодезичного моніторингу та рефрактометрії» (ГНДЛ-18) та навчально-наукової лабораторії «Опрацювання супутникових вимірів» Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка».

Автор брав участь у науково-дослідній роботі прикладних досліджень і розробок Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (2012-2013 рр.). Зокрема, матеріали досліджень увійшли до Звіту про виконання фундаментальних досліджень за рахунок видатків загального фонду державного бюджету «Встановлення взаємозв'язків між кінематичними і деформаційними параметрами та узагальненою сейсмічністю із застосуванням методу скінченних елементів» (Ф53/306-2013, Державний реєстраційний №0113U005266).

**Мета і завдання досліджень.** Основною метою дисертаційної роботи є розроблення на основі тривалих мареографічних та GNSS-вимірів методики їх спільного опрацювання для визначення швидкостей вікових ВРЗК та їх реконструкції в минулому (на прикладі Європейського континенту).

У рамках дисертаційної роботи поставлено такі основні завдання:

- обґрунтувати необхідну точність, з якою потрібно визначати рухи земної кори берегової лінії Європи за результатами мареографічних спостережень;

- розробити алгоритм спільного опрацювання результатів мареографічних і GNSS-спостережень з метою дослідження ВРЗК;
- дослідити систематичну різницю між результатами визначення ВРЗК за допомогою GNSS-спостережень і результатами мареографічних вимірювань на території Європи;
- теоретично обґрунтувати та розробити методику визначення кінематичних параметрів умовно жорстких тектонічних блоків за даними мареографічних спостережень.

**Об'єктом дослідження** є ВРЗК на береговій лінії території Європи.

**Предметом досліджень** є визначення ВРЗК на основі математичних моделей за даними мареографічних і GNSS-спостережень.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

- розроблено методику оцінювання точності визначення ВРЗК, яка базується на тривалих мареографічних спостереженнях;
- встановлено залежності зміни швидкості вікових ВРЗК від періоду усереднення результатів мареографічних спостережень;
- проведено, на основі аналізу GNSS-спостережень і результатів мареографічних вимірювань, розподіл систематичних різниць у результатах визначення ВРЗК;
- з метою виконання реконструкції ВРЗК в минулому і, ймовірно, прогнозування зміни поля швидкостей у часі розроблено теоретичні засади та методику визначення кінематичних параметрів лінійного поля швидкостей ВРЗК умовно жорстких тектонічних плит за даними тривалих мареографічних спостережень;
- за результатами опрацювання мареографічних спостережень побудовано кінематичну модель поля швидкостей умовно виділених тектонічних блоків території Європи.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі сумісного опрацювання результатів мареографічних і GNSS-спостережень на території Європи:

- виявлено систематичні різниці між обчисленими величинами лінійних швидкостей ВРЗК, які отримані в результаті мареографічних і GNSS-спостережень, що дають можливість сумісно опрацьовувати результати мареографічних і GNSS-спостережень з метою дослідження ВРЗК на побережжях;
- розроблено методику й алгоритм визначення кінематичних параметрів поля вікових швидкостей ВРЗК тектонічних блоків за даними тривалих мареографічних спостережень;
- побудовано кінематичну модель поля вікових швидкостей ВРЗК тектонічних блоків території Європи, на основі якої з'являється можливість прогнозувати зміни положення берегової лінії і яка має практичну цінність при реалізації інфраструктурних об'єктів на прибережних територіях.

Запропоновану методику можна використовувати для аналогічного дослідження інших світових узбереж.

**Основні положення, що виносяться на захист.**

- залежність точності визначення ВРЗК від тривалості мареографічних спостережень на території Європи;
- розподіл по береговій лінії Європи систематичних різниць між швидкостями ВРЗК, одержаних на основі тривалих мареографічних і GNSS-вимірів та інтерпретація їх зміни;
- теоретичні засади і методика визначення кінематичних параметрів лінійного поля швидкостей вертикальних рухів земної кори умовно жорстких тектонічних плит за даними тривалих мареографічних спостережень;
- кінематична модель поля вікових швидкостей ВРЗК умовно виділених тектонічних блоків території Європи.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи, отримані автором, опубліковані у співавторстві у працях [1, 2, 3, 4, 6, 8, 7, 9, 11] та одноосібно [5, 10]. В опублікованих дослідженнях [5, 10, 1] автору належить збір та аналіз впливу факторів, які впливають на результати мареографічних вимірів, а також розроблення системи класифікації цих факторів; у працях [1, 2, 8] – опрацювання результатів вимірів перманентних і мареографічних станцій, визначення швидкостей ВРЗК та побудова карти швидкостей; у роботах [2, 6, 7, 9, 3] – апробація методики, на основі якої проводилась реконструкція ВРЗК на території північної частини Європи за даними тривалих мареографічних спостережень, побудова просторової кінематичної моделі руху тектонічних блоків на території північної частини Європи. У дослідженнях [11, 4] висвітлено систематичну різницю між результатами визначення ВРЗК за допомогою GNSS-спостережень і результатами мареографічних вимірювань.

**Апробація результатів роботи.** Основні теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи представлено та обговорено на таких наукових зібраннях:

- XVIII Міжнародному науково-технічному симпозиумі «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS-технології», 10–15 вересня 2013 р., Алушта, Крим;
- XX Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2015» (22–24 квітня 2015 р. Львів – Яворів – Брюховичі);
- 5th International Youth Science Forum «LITTERIS ET ARTIBUS» (November 26–28, 2015, Lviv, Ukraine);
- XXI Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2016» (13–15 квітня 2016 р. Львів – Брюховичі);
- VI Міжнародній науковій конференції «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища», 20–23 вересня 2016 р., Львів;
- 6th International Youth Science Forum «LITTERIS ET ARTIBUS» (November 26–28, 2016, Lviv, Ukraine).

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 11 наукових праць [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. З них: 3 статті в науковому періодичному виданні України,

що входить до міжнародних наукометричних баз [2, 3, 4], 1 стаття у фахових виданнях із переліку ВАК України [5], одна стаття в закордонному періодичному виданні, яке входить до наукометричної бази даних Index Copernicus [1], 6 у збірниках тез наукових конференцій [6, 7, 8, 9, 10, 11].

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (363 найменування) та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 224 сторінки, ілюстрації складають 60 рисунків, 28 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та її основні завдання, висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, сформульовано основні положення, які виносяться на захист, викладено відомості про апробацію роботи, повноту публікацій результатів і їх впровадження.

У першому розділі дисертаційної роботи «**Сучасний стан дослідження вертикальних рухів земної кори**» проведено класифікацію вертикальних рухів земної кори, яка відрізняється від наявних класифікацій виділенням часових і просторових характеристик та чинників, які їх викликають. Виконано огляд методів визначення вертикальних рухів земної кори, на основі якого встановлено їх переваги та недоліки, характеристики точності й ефективності їх застосування в просторово-часовому аспекті.

Вертикальні рухи можна розрізняти як абсолютні і відносні рухи земної кори. Абсолютний вертикальний рух – це проекція просторового вектора зміщення пункту в геоцентричній системі координат на прямовисну лінію або нормаль до поверхні еліпсоїда. У сучасних системах координат напрям нормалі майже збігається з прямовисною лінією, відповідно ці проекції будуть майже однакові. Геоцентрична система координат не є стійкою в часі, оскільки її початок та напрям осей періодично визначаються з певними систематичними та випадковими похибками. Тому визначення абсолютних ВРЗК – це ідеальне визначення, до якого ми прагнемо, але, як правило, ми завжди визначаємо відносні ВРЗК. При дослідженні відносних вертикальних рухів земної кори геодезичними методами вихідний пункт на поверхні приймаємо за нерухомий і відносно нього робимо повторні цикли спостережень. Визначення ВРЗК відносно поверхні геоїда також будуть відносними, оскільки поверхня геоїда змінює своє положення з часом. Методами вивчення відносних ВРЗК є повторне нівелювання, нахиломірні спостереження й мареографічні вимірювання. Кожен із наведених методів має низку своїх переваг і недоліків.

Найбільш розповсюдженими технологіями вивчення абсолютних рухів земної кори є VLBI, SLR, GNSS, результати супутникової альтиметрії. Усі ці методи віднесені до абсолютної системи координат і на підставі довготривалих рядів спостережень дають нам можливість вивчати абсолютні рухи земної кори. Але, на жаль, станцій VLBI є дуже мало, станцій SLR – так само обмежена кількість (вимірювання проводяться практично тільки на обсерваторіях).

Під сучасними рухами земної кори зазвичай розуміють рухи останніх трьох століть, коли для їх вивчення застосовувалися інструментальні методи. Сучасні рухи земної кори, які вивчаються геодезичними методами, можна умовно поділити на короткотривалі та вікові. Вікові рухи поширюються на значних територіях, які співвимірні з розмірами тектонічних блоків і тривають протягом сотні років. Лінійний тренд вікових рухів, які спричинені напружено-деформованим станом земної кори, є важливою характеристикою зміни земної поверхні, який. Єдиним достовірним інструментальним методом вивчення вікових рухів можуть бути мареографічні спостереження, оскільки тривалість безперервних часових серій на деяких територіях (особливо на території Фенноскандії та центральної Європи) переважає сотні років.

Довготривалість часових серій є якісним матеріалом при дослідженні ВРЗК, але при їх використанні необхідно враховувати всі фактори, які впливають на рівень моря. При цьому відкритим є питання тривалості мареографічних спостережень, необхідної для дослідження ВРЗК і осереднення мареографічних вимірів. На сьогодні не повною мірою вивчені питання впливу джерел похибок, викликаних різними чинниками, на мареографічні спостереження. Однак видовження в часі мареографічних спостережень дозволяє нівелювати вплив цих факторів і визначати ВРЗК з високою точністю. Ще одним недоліком є те, що записи мареографів фіксують, окрім ВРЗК, ще й евстатичні коливання океану. Тому необхідно розробити методики, які б дозволяли опрацьовувати результати мареографічних спостережень з метою дослідження саме ВРЗК, а не змін в океані.

Ще одним методом дослідження ВРЗК є GNSS-спостереження. Поява GNSS-станцій надала можливість проведення дослідження ВРЗК з субміліметровою точністю, а їх просторове розміщення дозволяє здійснювати моніторинг на глобальному і локальному рівнях. У наш час існує мережа перманентних станцій (кількість яких із кожним роком невпинно зростає), розташованих по всій Землі. Істотною перевагою використання цих методів є можливість спостерігати за змінами рухів земної кори в реальному часі. Загалом, величини ВРЗК на території Європи змінюються в межах від десятка міліметрів за рік (до прикладу, величина підняття Ботнічної затоки становить 9 мм/рік) до декількох міліметрів (у південній частині території Європи). За результатами повторних нівелювань на території Західної Європи встановлено, що величини ВРЗК сягають декількох міліметрів, а точність їх визначення становить 0,1–0,3 мм/рік.

Перевагами GNSS-спостережень як методу дослідження ВРЗК є: безперервний моніторинг; висока точність; оперативність вимірів; простота і автоматизація виконаних робіт. Але, як і будь-який інший метод досліджень, GNSS-спостереження мають ряд своїх недоліків, а саме: необхідність врахування замін антен на перманентних станціях; зміни моделей опрацювання результатів; стійкість перманентних станцій; врахування різноманітних похибок – тропосферних, іоносферних, системні варіації яких можуть призводити до систематичних зміщень.

Питанням дослідження вертикальних рухів земної кори присвячена значна кількість наукових праць вітчизняних і зарубіжних авторів; вагомий внесок для вирішення цього питання зробили такі відомі вчені, як Сомов В.І., Мещеряков Ю.О.,



Кузнєцова В.Г., Гофштейн І.Д., Третяк К.Р., Смірнова О.М., Скриль В.А., Гусєва Т.В., Галаганов О.М., Kowalczyk K., Rajner M., Santamaría-Gómez A., Bouin M.N., Wöppelmann G., Zervas Ch., Altamimi Z., Kuo C.Y., Shum C.K., Mäkinen J., Saaranen V., Lidberga M., Nordman M., Pettersen B., Church J.A., White N.J., Nerem R.S., Mitchum G.T., García F., Cazenave A. та інші.

Авторами виконано огляд методів визначення вертикальних рухів земної кори, на основі якого встановлено їх переваги та недоліки, характеристики точності й ефективності їх застосування в просторово-часовому аспекті. Представлено детальний аналіз мареографічних спостережень і доведено його ефективність, порівняно з іншими методами, для вивчення вікових рухів земної кори.

При використанні мареографічних часових серій необхідно врахувати всі чинники, які впливають на рівень моря, і встановити необхідні тривалості мареографічних спостережень для визначення ВРЗК.

Другий розділ дисертаційної роботи «**Фактори, що впливають на зміну рівня моря**» присвячений аналізу всіх факторів, які змінюють положення рівня моря та океану. Встановлено, що найбільший вплив на підвищення рівня моря має термальне розширення, спричинене нагріванням океанів, і втрата об'єму льоду, розташованого на суші (танення льодовиків, льодовикових покривів і льодовикових шапок). Найменш істотний вплив виявляють горіння тропічних лісів, спалювання викопних видів палива, осадкоутворення, будівництва дамб, річковий стік / розлив та інше.

Ендогенні та екзогенні фактори мають різну природу, характер дії (випадковий чи систематичний), часовий масштаб (від кількох секунд до мільйонів років). Усі чинники, під впливом яких відбувається зміна рівня моря, можна класифікувати за певними спільними ознаками. Нами запропоновано класифікацію всіх факторів (Таблиця 1), що впливають на зміну рівня моря, за такими спільними ознаками, як: масштаб (місце дії), тривалість, походження, частота їх виникнення, геодинамічні, атмосферні, антропогенні фактори, гравітаційний вплив, зміни в океані, а також їх внесок у зміну рівня моря. Запропонована класифікація відрізняється від інших тим, що охоплює більшу кількість факторів і детальніший поділ на групи за спільними ознаками: місце і тривалість їх прояву, природа та характер дії. Виокремлено систематичні, випадкові, періодичні, антропогенні, атмосферні та геодинамічні фактори, які сприяють підвищенню або зниженню рівня моря.

Таблиця 1. **Класифікація факторів впливу на зміну рівня моря**

		Часовий масштаб			
		Короткотривалі (дні – роки)	Довготривалі (роки – десятки років)	Вікові (десятки років – сотні років)	
Масштаб розподілу	Глобальний	Періодичні	Припливи (*) (+/-)	<u>El Niño – Ель-Ніньйо (+/-)</u> <u>NAO – North Atlantic Oscillation – Північно-Атлантичне колювання (+/-)</u> <u>PDO – Pacific Decadal Oscillation – Тихоокеанське десятилітнє колювання (+/-)</u>	Варіації кутової швидкості обертання Землі (+) та віковий дрейф ядра (+)

	Систематичні	<i>Атмосферний тиск</i> (+/-)	Спалювання викопних видів палива (+) Зрошення земель (-) Витік бурового розчину (-) Будування дамб і водосховищ (+) Урбанізація (+) Секвестрація води в резервуарах та озерах (-)	<i>Випаровування (+)</i> <i>Осадкоутворення (+)</i> Зміна густини води (+/-) Зміна об'єму океанічних басейнів (+/-) Ізостазія (*) (+/-) Зміна маси льоду (+/-) Зміна поверхні геоїда (*) (+/-) <i>Термальне розширення океану (+)</i> <i>Океанічна циркуляція (+/-)</i> <i>Зміна солоності (+/-)</i>
		Випадкові	<i>Сейші (+)</i> <i>Цунамі (+)</i>	
Регіональний	Періодичні		<i>Зміна течій (+/-)</i>	
	Систематичні	<i>Вітри і штормові нагони (+/-)</i> <i>Горіння тропічних лісів (+)</i> <i>Річковий стік/розлив (+)</i>	<i>Видобування підземних вод (+)</i> <i>Вирубка лісу (обезліснення) (+)</i>	Тектонічне підняття/опускання (+/-) PGR – Post-glacial rebound – Післяльодовикова віддача (+/-) Танення льодовиків та льодовикових покривів (+)
	Випадкові	<i>Землетруси (-)</i>		
Локальний	Періодичні		<i>Зменшення об'єму озер (+)</i>	
	Систематичні		<i>Просочування з водосховищ (+)</i>	

(\*) - фактори, спричинені зміною гравітаційного поля.

**Танення льодовиків та льодовикових покривів** – геодинамічні фактори.

*Вітри і штормові нагони* – атмосферні фактори.

*Сейші* – випадкові фактори.

*Зменшення об'єму озер* – екзогенні фактори.

Ізостазія – ендегенні фактори.

Просочування з водосховищ (+) – фактори, які призводять до підвищення рівня моря (+).

Землетруси (-) – фактори, які призводять до зниження рівня моря (-).

*Вітри і штормові нагони (+/-)* – фактори, які можуть призводити як до підвищення, так і до зниження рівня моря.

*Вирубка лісу (обезліснення)* – антропогенні фактори.

*Зміна течій* – зміни в Океані.

На основі проведеного аналізу літературних джерел, нами виконано класифікацію факторів за величиною впливу на рівень моря. Встановлено, що більшість факторів носять локальний і періодичний характер. Видовження тривалості мареографічних спостережень призводить до їх нейтралізації. Відповідно, від особливостей впливу факторів на рівень моря залежить необхідна для вивчення вікових ВРЗК тривалість спостережень на мареографах. У зв'язку з цим необхідно розробити методику визначення за даними мареографічних спостережень залежності точності ВРЗК від тривалості спостережень та територіального впливу цих факторів. Виникає необхідність аналізу сумісного визначення ВРЗК за даними мареографічних і GNSS-спостережень на території Європи.

У третьому розділі дисертаційної роботи «Розробка методики та алгоритму спільного опрацювання результатів мареографічних та GNSS-спостережень» нами прийнято, що точність визначення ВРЗК за даними мареографічних спостережень повинна бути на порядок вища від самої вертикальної швидкості

мареографа. Встановлено, що середня вертикальна швидкість мареографів Європи за абсолютною величиною без врахування напрямку руху складає 2,56 мм/рік. Відповідно, вертикальна швидкість повинна визначатися з точністю не гіршою, ніж  $0,256 \approx 0,3$  мм/рік. Для кожного мареографа Європи необхідна різна тривалість спостережень для досягнення точності 0,3 мм/рік визначення швидкостей вікових ВРЗК (рис. 1).



Рис. 1. Розподіл необхідної тривалості мареографічних спостережень для досягнення заданої точності

Найбільш тривалі спостереження для стабілізації лінійних швидкостей необхідні регіону Фенноскандії, Данії, північно-західній частині Німеччини та Нідерландам. Найменший час мареографічних спостережень відповідає південній частині Іспанії (Альхесірас (Algeciras) – 30, Малага (Malaga) – 30, Тарифа (Tarifa) – 32 роки). Для того щоб з'ясувати й пояснити причини цих відмінностей, усі часові серії були проаналізовані за допомогою розкладу в ряди Фур'є. За результатами визначення коефіцієнтів ряду Фур'є була виконана апроксимація часових серій різною кількістю гармонік. На рисунку 2 зображено приклад апроксимації часових серій Осло (Норвегія) (а) та Альхесіраса (Іспанія) (б) гармонікою 30-го порядку.

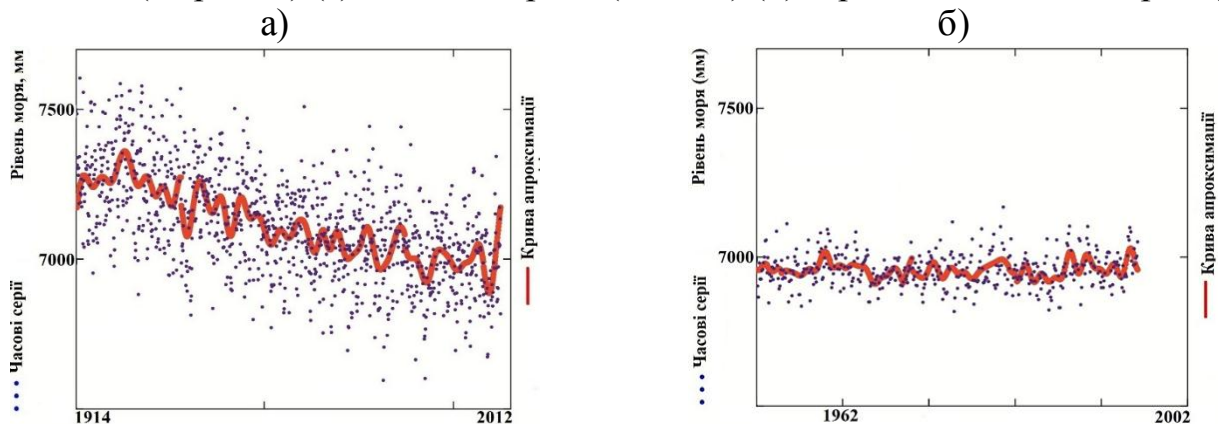


Рис. 2. Апроксимація часових серій Осло (Норвегія) (а) та Альхесіраса (Іспанія) (б) гармоніками 30-го порядку

З аналізу апроксимації часових серій усіх мареографів Європи та рисунка 2 було встановлено, що найбільші амплітуди коливань зазнають мареографи Північного та Балтійського морів порівняно з рештою мареографів Європи. Для території Фенноскандії значні амплітуди коливань можна пояснити впливом післяльодовикової віддачі – реакції Землі на відступ льодовика протягом останнього льодовикового періоду. Це знаходить своє відображення в піднятті названої території, максимальні тренди якого ( $\sim 11$  мм/рік) припадають на Ботнічну затоку, а тренди, близькі до 0, – на околиці колишнього льодовикового щита. Ще однією причиною значних амплітудних коливань рівня моря на території Балтійського моря є вплив NAO (North Atlantic Oscillation – Північноатлантичного коливання) та дія західних вітрів. Ці вітри можуть змінювати свій напрямок, а також силу. Цим також можна пояснити значну амплітуду коливань у досліджуваному регіоні. Відповідно, для цієї території необхідні триваліші ряди мареографічних спостережень для визначення ВРЗК.

З метою порівняння визначених вікових ВРЗК за допомогою мареографічних і GNSS-спостережень була опрацьована база даних часових серій GNSS-станцій та мареографів. Нами обчислено лінійні швидкості зміни висотного положення GNSS-станцій і мареографів із їх оцінками точності. З аналізу визначених лінійних швидкостей ВРЗК з допомогою мареографічних і GNSS-спостережень випливає, що майже на всій досліджуваній території Європи результати визначення ВРЗК збігаються за напрямком, але не збігаються за величиною, тобто містять постійну різницю.

З метою вивчення різниць швидкостей вікових ВРЗК, визначених за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень, було виконано наведені нижче дослідження. Відібрано мареографи, на яких ведуться спостереження більше 30 років і часові серії яких є безперервними. А також відібрано GNSS-станції, які розташовані вздовж берегової лінії, з мінімальною тривалістю безперервних спостережень – 4 роки. У результаті проведення досліджень отримано для всієї берегової лінії Європи значення швидкостей ВРЗК за даними мареографічних та GNSS-спостережень. За цими даними виконано детальний розрахунок середніх різниць  $\Delta$  ( $\Delta = V_{\text{map}}^{\text{int}} - V_{\text{GNSS}}^{\text{int}}$ , мм/рік) між значеннями інтерпольованих швидкостей ВРЗК, одержаних за даними мареографічних і GNSS-спостережень. За результатами розподілу  $\Delta$  виділено 4 умовні блоки – території, для яких спостерігаються майже однакові в межах точності їх визначення значення середніх різниць  $\Delta$ . Перший блок (I) – це територія Фенноскандії та Центральної Європи, другий блок (II) – це територія Західної Європи, третій блок (III) – це територія Великої Британії та Південної Європи, четвертий блок (IV) – це територія Апеннінського півострова (рис. 3).

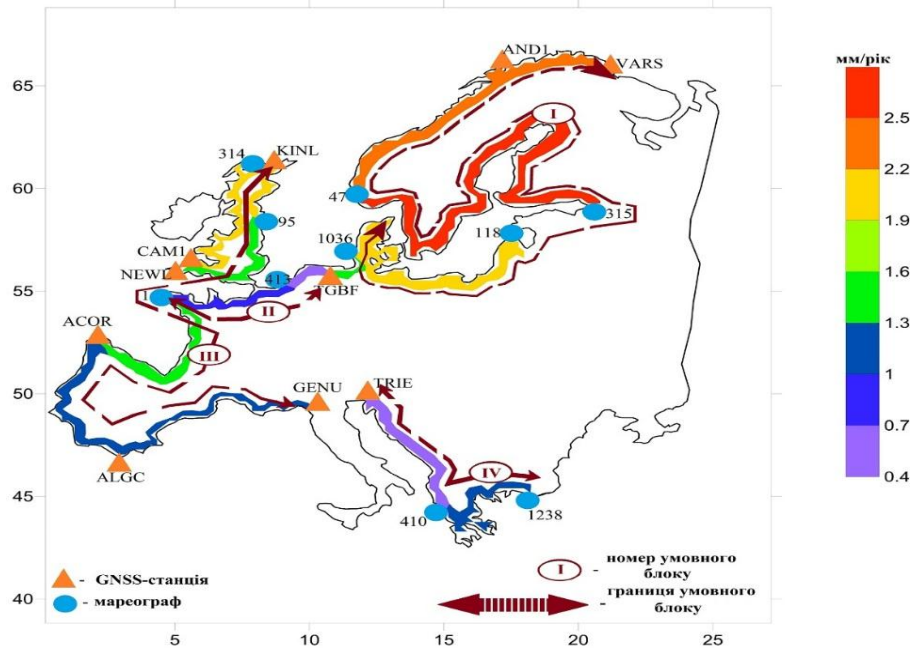


Рис. 3. Розподіл середніх різниць  $\Delta$  (мм/рік) вздовж берегової лінії Європи з виділеними чотирма умовними блоками

Як видно з аналізу рисунка 3, найбільші величини  $\Delta$  (до 2,5 мм/рік) характерні для території Фенноскандії, найменші (до 0,6 мм/рік) – для узбереж території Нідерландів, Хорватії, Албанії, частково – Бельгії, Італії (північно-східна частина) та Греції (північно-західна частина).

Першопричиною появи систематичних різниць  $\Delta$  є підвищення глобального середнього рівня моря. Розбіжності у визначенні швидкостей ВРЗК за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень є близькими до значень зростання глобального середнього рівня моря. Однак існують території, на яких спостерігаються розбіжності між значеннями систематичних різниць  $\Delta$  і значеннями зростання глобального середнього рівня моря. Аномальні значення підвищення чи зниження середнього рівня моря можна пояснити систематичними змінами атмосферного тиску на певних територіях, які призводять до утворення NOA (North-Atlantic Oscillation) та PDO (Pacific Decadal Oscillation), а також впливом західних вітрів. Ці вітри можуть змінювати свій напрямок та силу. Цим також можна пояснити аномальне спадання глобального середнього рівня моря, що знаходить своє відображення в мареографічних часових серіях. Також результати визначення вікових ВРЗК за допомогою мареографічних спостережень можуть бути спотворені океанографічними складовими або змінами гравітаційного поля Землі внаслідок післяльодовикової віддачі.

Врахування розподілу середніх різниць  $\Delta$  має вагомe значення для сумісного опрацювання мареографічних і GNSS-спостережень.

У четвертому розділі дисертаційної роботи «**Реконструкція вертикальних рухів земної кори за даними мареографічних спостережень**» розроблено теоретичні засади і методику визначення кінематичних параметрів лінійного поля швидкостей ВРЗК умовно жорстких тектонічних плит за даними тривалих мареографічних спостережень. Під терміном «реконструкція» ми розуміємо відтворення ВРЗК, які відбувалися в минулому, на певну епоху. Вихідними даними для проведення реконструкції ВРЗК служать часові серії мареографів, з яких ми

знаходимо швидкість вертикального руху мареографів, осереднену на певну середню епоху  $t_0$  за певний період спостережень  $\Delta t$  років. На основі тектонічного районування для дослідження відбираються мареографи з лінійним полем вертикальних швидкостей.

Зміна нахилу тектонічного блоку характеризується швидкістю зміни максимального кута нахилу  $\alpha_0$  і положенням осі нульових швидкостей (лінія, у всіх точках якої вертикальна швидкість дорівнює нулю) (рис. 4). Положення лінії нульових швидкостей, швидкість зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку  $\alpha_0$  та азимут напрямку зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку  $\beta_0$  є кінематичними параметрами тектонічного блоку.

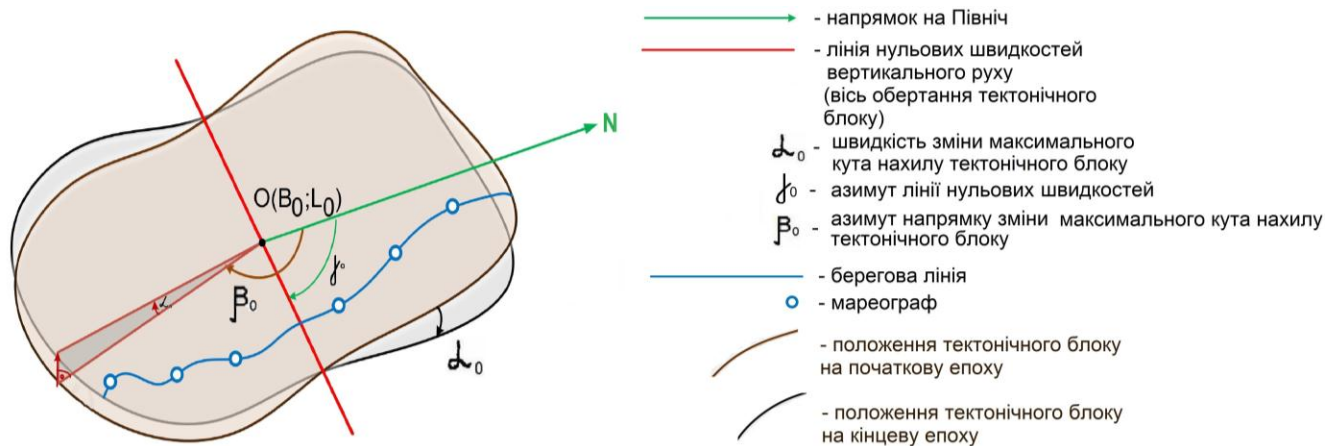


Рис. 4. Схематичне зображення тектонічного блоку та його кінематичних параметрів

Математична модель визначення ВРЗК з допомогою мареографічних спостережень за представленими кінематичними параметрами повинна мати мінімальне відхилення від середніх швидкостей ВРЗК, визначених за допомогою мареографів. Запропонована методика передбачає розв'язання поставленого завдання в декілька етапів методом наближень.

**Нульове наближення.** Нульове наближення необхідне нам для забезпечення збіжності результатів точних методів. У межах окремого блоку достатньо прийняти плоску прямокутну систему координат з осями В (широта) і L (довгота). Для кожного мареографа можна записати такий лінійний вираз (1):

$$m \cdot V + n \cdot L + p = V_{\text{мар}} \quad (1)$$

де В і L – координати мареографа,  $V_{\text{мар}}$  – середня швидкість вертикального руху мареографа,  $m, n, p$  – невідомі коефіцієнти. Розв'язавши систему лінійних рівнянь за способом найменших квадратів, обчислюємо невідомі коефіцієнти  $m, n, p$ . Знаходимо середню широту всіх відібраних для дослідження мареографів  $V_{\text{сер}}$  і приймаємо її за широту точки О, яка знаходиться на лінії нульових швидкостей, тобто  $V_{\text{сер}} = V_0$ . Підставивши у вираз (1) визначені коефіцієнти та  $V_0$ , знаходимо значення  $L_0$ :

$$L_0 = \frac{-m \cdot B_0 - p}{n}, \quad (2)$$

де  $(B_0; L_0)$  – це координати точки, через яку проходить лінія нульових швидкостей. Далі знаходимо азимут напрямку зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку  $\beta_0$  і швидкість зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку  $\alpha_0$ . Визначені параметри служать вихідними даними для першого наближення.

**Перше наближення** – це метод точного розв’язку на сфері, який передбачає пошук необхідних параметрів відносно вертикальних швидкостей мареографів. Для кожного мареографа складається наступне рівняння:

$$V = \alpha_0 \cdot \left( R \cdot \sqrt{(B_i - B_0)^2 + \frac{(B_i - B_0)^2}{\ln \left( \frac{\tan(\frac{\pi}{4} + \frac{B_i}{2})}{\tan(\frac{\pi}{4} + \frac{B_0}{2})} \right)^2} \cdot (L_i - L_0)^2} \right) \cdot \cos \left( \arctan \left( \frac{L_i - L_0}{\ln \left( \frac{\tan(\frac{\pi}{4} + \frac{B_i}{2})}{\tan(\frac{\pi}{4} + \frac{B_0}{2})} \right)} \right) \right) - \beta_0 + \begin{cases} 0, (B_2 > B_1) \\ \pi, (B_1 > B_2) \end{cases} \quad (3)$$

де  $(B_i; L_i)$  – це значення широти та довготи  $i$ -того мареографа,  $R$  – радіус Землі. За значеннями координат  $(B_i; L_i)$  кожного мареографа знаходяться наближені значення вертикальних швидкостей мареографів  $V_{\text{набл}}$ . За результатами вимірювань вертикальних швидкостей мареографів  $V_{\text{вим}}$  та наближеними значеннями вертикальних швидкостей  $V_{\text{набл}}$  складаємо нелінійну цільову функцію за виразом (3) для всіх мареографів:

$$f(B, L, \beta, \alpha) = \sum_{i=1}^n (V_{\text{вим}} - V_{\text{набл}})^2, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість мареографів. Для знаходження мінімуму функції  $\sum (V_{\text{вим}} - V_{\text{набл}})^2 = \min$  застосуємо метод спряжених градієнтів Флетчера-Рівса. У результаті виконання ітераційних обчислень ми отримуємо точні координати точки  $O$ , швидкість зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку  $\alpha_0$  і азимут напрямку зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку  $\beta_0$ .

**Друге наближення (розв’язок за способом найменших квадратів).** Ця ітерація необхідна для перевірки збіжності отриманих результатів та їх оцінки точності за допомогою способу найменших квадратів. Вихідними даними для другого наближення слугують результати параметрів плити  $(B_0, L_0, \alpha_0, \beta_0)$ , одержані в першому наближенні. На основі виразів (3) складаємо лінійне рівняння поправок (5):

$$\frac{\partial V}{\partial B_0} \cdot \delta B_0 + \frac{\partial V}{\partial L_0} \cdot \delta L_0 + \frac{\partial V}{\partial \alpha_0} \cdot \delta \alpha_0 + \frac{\partial V}{\partial \beta_0} \cdot \delta \beta_0 + (V_{\text{вим}} - V_{\text{набл}}) = 0. \quad (5)$$

Знаходимо часткові похідні до рівняння поправок. Із розв’язку рівнянь поправок знаходимо поправки в координати  $(B_0, L_0, \alpha_0, \beta_0)$ , які повинні бути незначними порівняно із самими значеннями, інакше – під сумнівом буде збіжність

результатів, та виконуємо їх оцінку точності. У результаті отримуємо кінцеві значення ( $V_0, L_0, \alpha_0, \beta_0$ ) з їх оцінкою точності.

Апробація цієї методики проведена для берегової лінії території північної Європи. Ми припускаємо, що згідно з тектонічним районуванням, усі відібрані для дослідження мареографи знаходяться в межах чотирьох блоків (рис. 5). Ці плити були утворені в різні геологічні періоди і, припускаємо, мають різну кінематику.

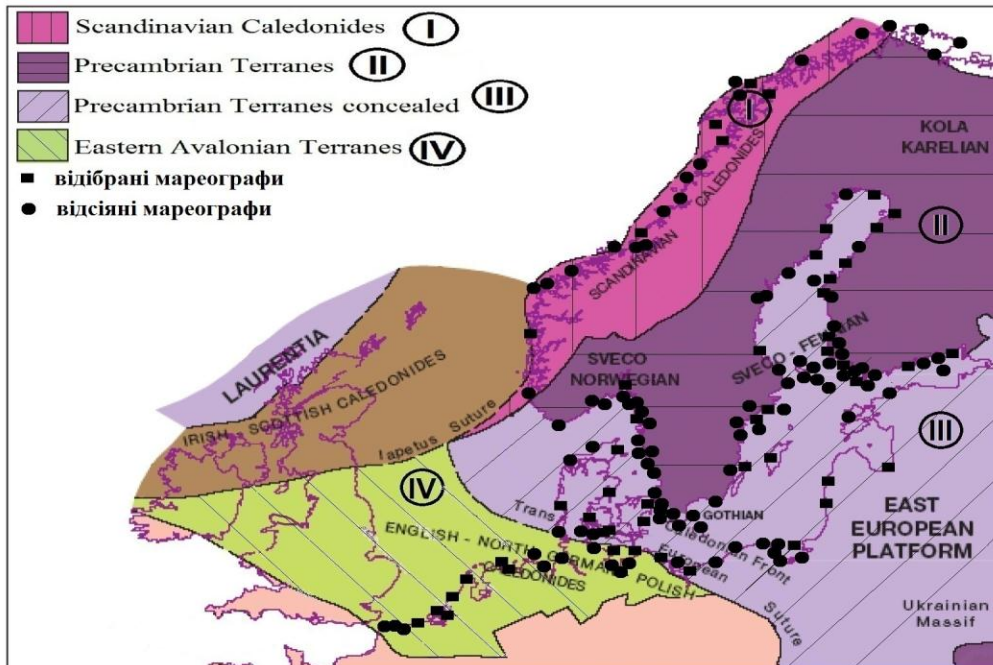


Рис. 5. Тектонічне районування території північної Європи з позначенням мареографів

На основі представленого алгоритму було обчислено зміни в часі кінематичних параметрів ( $V_0, L_0, \alpha_0, \beta_0$ ) тектонічних блоків I, II, III, IV. Для прикладу в таблиці 4 представлено результати обчислення кінематичних параметрів тектонічних блоків способом наближень на середню епоху  $t_0 = 1970$  рік при вибраній тривалості спостережень  $\Delta t = 60$  років.

Таблиця 4

**Результати обчислення кінематичних параметрів тектонічних блоків способом наближень за результатами періоду усереднення мареографічних спостережень при  $\Delta t = 60$  років на середню епоху  $t_0 = 1970$  рік**

	I тектонічний блок	II тектонічний блок	III тектонічний блок	IV тектонічний блок
$V_0, ^\circ$	$61,24 \pm 0,43$	$57,00 \pm 0,003$	$55,55 \pm 0,004$	$53,3114 \pm 0,0401$
$L_0, ^\circ$	$5,19 \pm 0,10$	$19,13 \pm 0,02$	$25,42 \pm 0,03$	$69,8295 \pm 0,2578$
$\alpha_0, \text{рад/рік}$	$0,0023 \pm 0,0069$	$0,0020 \pm 0,000036$	$-0,0009 \pm 0,00002$	$-0,0003 \pm 0,00006$
$\beta_0, ^\circ$	$96,8020 \pm 0,0057$	$196,7415 \pm 0,00006$	$193,5801 \pm 0,00006$	$194,7832 \pm 0,0006$
С.к.п. визначення швидкості ВРЗК, $m_{V_{\text{mod}}}, \text{мм/рік}$	0,0002	0,9446	0,1235	0,6282



Результати оцінки точності кінематичних параметрів підтверджують достовірність кінематичної моделі тектонічного блоку. Дослідимо зміну кінематичних параметрів ( $B_0, L_0, \alpha_0, \beta_0$ ) тектонічного блоку III в часі. Для цього для періоду усереднення результатів мареографічних спостережень  $\Delta t = 60$  років змінювалася середня епоха  $t_0$  через 1 рік у межах з 1958 по 1978 рік. Для прикладу результати зміни параметрів  $\alpha_0$  і  $\beta_0$  при  $\Delta t = 60$  років для тектонічного блоку III наведено на рисунку ба. З метою візуалізації змін лінійного поля швидкостей ВРЗК на рисунку б (б–г) наведено результати просторово-часового розподілу ВРЗК тектонічного блоку III за період з 1958 по 1978 рік.

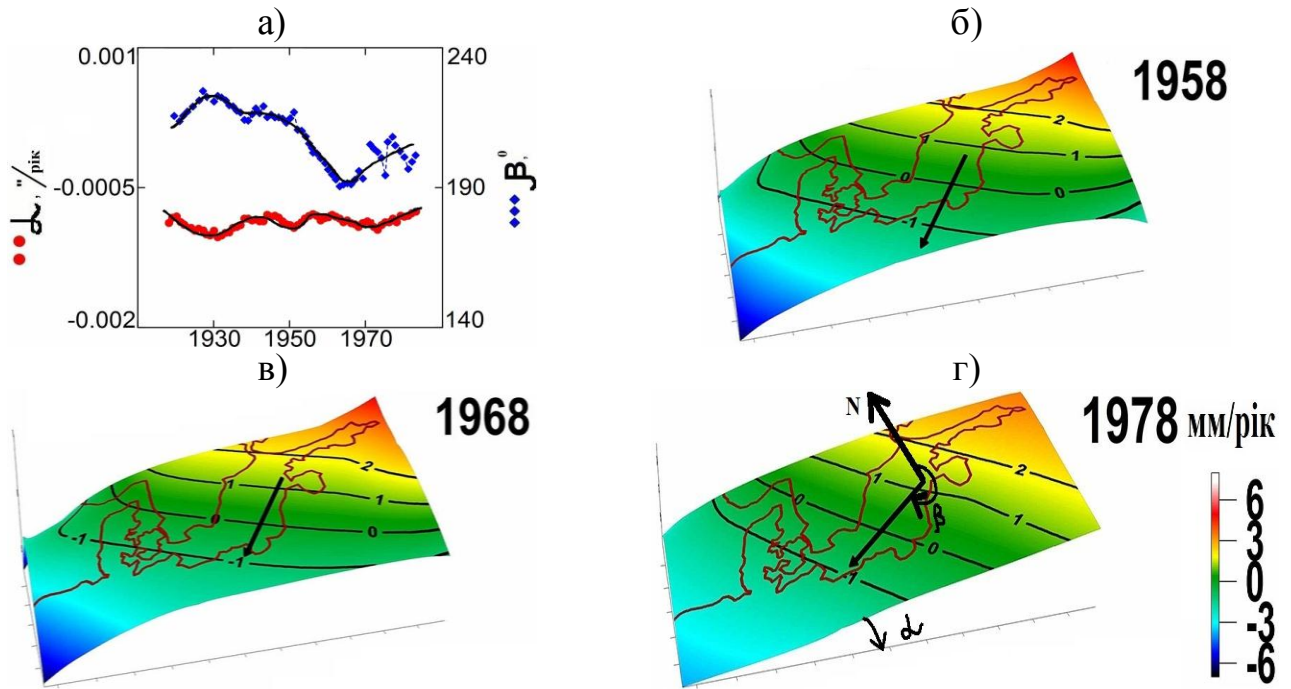


Рис. 6. Зміна параметрів  $\alpha_0$  і  $\beta_0$  (а) та просторово-часовий розподіл поля швидкостей ВРЗК тектонічного блоку III на середні епохи  $t_0 = 1958$  (б), 1968 (в), 1978 (г) рік при  $\Delta t = 60$  років

Для тектонічного блоку III значення швидкості зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку  $\alpha$  є від'ємними і хвилеподібно поступово зменшуються в межах від  $-0,0013''/\text{рік}$  до  $-0,0008''/\text{рік}$ . Інтенсивність рухів тектонічного блоку з часом також зменшується. Азимут напрямку зміни максимального кута нахилу тектонічного блоку  $\beta$  рівномірно зміщується в південно-західному напрямку (від  $190^\circ$  до  $232^\circ$ ). Західна частина тектонічного блоку зазнає опускання, а східна частина – навпаки підймання. 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 інші автори 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. Опускання західної території тектонічного блоку III підтверджується результатами опрацювання GNSS-вимірів на території Польщі.

Для переходу до величин абсолютних рухів земної кори необхідно враховувати систематичні різниці  $\Delta$  між швидкостями земної кори, визначеними за даними мареографічних та GNSS-спостережень. У такому випадку вихідними швидкостями для проведення реконструкції ВРЗК будуть швидкості, скоректовані значенням відповідної різниці  $\Delta$ . Найбільша швидкість абсолютних ВРЗК (7 мм/рік) спостерігається в районі Ботнічної затоки. Найбільша швидкість опускання земної кори (-3 мм/рік) – на території тектонічного блоку Авалонія. Отримані результати абсолютних ВРЗК майже повністю підтверджуються результатами високоточних нівелювань, а систематичні розбіжності пов'язані зі зміною абсолютного глобального зростання рівня моря. Загалом, кінематика тектонічних блоків корелює з неотектонічними рухами, відображеними в геологічних розрізах. За допомогою виконаних досліджень можна проводити реконструкцію в часі ВРЗК для вивчення історичного розвитку ізостатичних процесів і змін гравітаційного поля Землі, а також для дослідження змін висотного положення геодезичних мереж і стійкості систем висот.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено наукове завдання дослідження ВРЗК Європи з використанням методики опрацювання мареографічних та GNSS-спостережень. У результаті виконаних досліджень:

1. Проведено класифікацію ВРЗК за просторово-часовими характеристиками чинників, які їх викликають, і виконано огляд існуючих методів дослідження ВРЗК. Виконано детальний аналіз мареографічних спостережень і доведено його ефективність, порівняно з іншими методами, для вивчення вікових ВРЗК.
2. На основі розробленої класифікації встановлено систематичні, випадкові, періодичні, антропогенні, екзогенні та ендегенні, атмосферні та геодинамічні фактори, які впливають на зміну рівня моря та океану та визначено їх середні величини внеску в зміну рівня моря. Доведено необхідність розроблення методики визначення вікових ВРЗК за допомогою мареографічних і GNSS-спостережень.
3. Доведено необхідність визначення вікових ВРЗК берегової лінії Європи за результатами мареографічних спостережень з точністю 0,3 мм/рік. При цьому необхідна тривалість мареографічних спостережень залежить від географічного розташування мареографів і коливається в межах 30–70 років.
4. На основі роздільного опрацювання результатів GNSS-спостережень і мареографічних спостережень виявлено систематичні різниці  $\Delta$  між визначеними швидкостями ВРЗК, які для берегової лінії Європи змінюються в межах від  $0,6 \pm 0,1$  до  $2,6 \pm 0,9$  мм/рік. Вони обумовлені зміною абсолютного глобального зростання рівня моря, сезонними змінами атмосферного тиску та дією вітрів.
5. За результатами дослідження розроблено теоретичні засади і методику визначення кінематичних параметрів лінійного поля швидкостей ВРЗК умовно жорстких тектонічних плит за даними тривалих мареографічних спостережень. Розроблена методика дає можливість виконувати реконструкцію ВРЗК в минулому і, ймовірно, прогнозувати зміну поля швидкостей у часі. Це можна

використати під час проектування та будівництва гідротехнічних споруд, а також для відтворення та прогнозування зміни положення берегової лінії території.

6. Побудовано кінематичну модель поля швидкостей умовно виділених тектонічних блоків території Європи на основі опрацювання мареографічних спостережень. Отримані результати практично повністю підтверджуються результатами високоточних нівелювань, а систематичні розбіжності пов'язані зі зміною висоти геоїда в часі на відповідних територіях та абсолютним глобальним зростанням рівня моря. Загалом, кінематика тектонічних блоків корелює з неотектонічними рухами, відображеними в геологічних розрізах.
7. За допомогою виконаних досліджень можна проводити реконструкцію в часі ВРЗК для вивчення історичного розвитку ізостатичних процесів і змін гравітаційного поля Землі, а також для дослідження змін висотного положення геодезичних мереж і стійкості систем висот.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- **Стаття в науковому періодичному виданні іншої держави (Польща):**
  1. Dosyn S. Study of vertical movements of the European crust using tide gauge and GNSS observations / K. Tretyak, S. Dosyn // Reports on Geodesy and Geoinformatics.
- **Статті в наукових періодичних виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних:**
  2. Досин С.І Реконструкція вертикальних рухів земної кори за даними мареографічних спостережень / К.Р. Третяк, С.І. Досин // Геодинаміка. – 2014. – №2(17). – С. 7–29.
  3. Досин С.І. Моделювання вертикальних рухів тектонічних блоків за даними мареографічних спостережень / К.Р. Третяк, С.І. Досин // Геодинаміка. – 2016. – №1(20). – С. 7–20.
  4. Досин С.І. Аналіз результатів визначення швидкостей вертикальних рухів земної кори берегової лінії Європи за даними мареографічних та GNSS-спостережень / К.Р. Третяк, С.І. Досин // Геодинаміка. – 2016. – №2 (21). – С. 18–35.
- **Публікації у наукових фахових виданнях України:**
  5. Досин С.І. Мареографічний метод визначення вертикальних рухів земної кори – аналіз впливу природних і техногенних факторів / С.І. Досин // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2016. – Випуск II (32). – С. 83–98.
- **Публікації у збірниках матеріалів конференцій:**
  6. Dosyn S. Reconstruction of vertical movements of the Earth's crust, according to tide gauge observations / K. Tretyak, S. Dosyn // EUREF Symposium. – 2015. – P. 47.
  7. Dosyn S. Reconstruction of changing kinematic parameters of tectonic blocks based on the results of tide gauge measurements (the territory of Northern Europe is taken as an example) [Електронний ресурс] / K. Tretyak, S. Dosyn // 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tides. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://g-et2016.units.it/node/157>.

8. Dosyn S. Study of Vertical Movements of the European Crust Using Tide Gauge and GNSS-observations / K. Tretyak, S. Dosyn // 5th International Youth Science Forum «Litteris et Artibus». – 2015. – С. 104–105.
9. Досин С.І. Реконструкція вертикальних рухів тектонічних блоків за даними мареографічних спостережень / К.Р. Третяк, С.І. Досин // Матеріали VI Міжнародної наукової конференції «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища». – 2016. – С. 269–271.
10. Досин С.І. Можливості побудови карт вертикальних рухів земної кори з допомогою мареографічних спостережень та результатів GNSS-вимірювань в Європі / С.І. Досин // Матеріали XVIII Міжнародного науково-технічного симпозиуму «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS-технології». – 2013. – С. 311–312.
11. Dosyn S. Differences between GNSS observations and tide gauge observations in studying vertical land movements / K. Tretyak, S. Dosyn // 6th International Youth Science Forum «LITTERIS ET ARTIBUS», Lviv, Ukraine, November 26–28, 2016.

### АНОТАЦІЯ

Досин С.І. Визначення швидкостей вікових вертикальних рухів земної кори за даними мареографічних та GNSS-спостережень (на прикладі Європейського континенту). – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2017.

У дисертаційній роботі виконано дослідження вікових вертикальних рухів земної кори (ВРЗК) Європи на основі двох незалежних методів, а саме: результатів мареографічних та GNSS-спостережень. Здійснено опис і класифікацію факторів, які впливають на зміну рівня моря. Обчислено точність, з якою можна досліджувати вікові рухи земної кори за результатами мареографічних спостережень. Представлено методику виявлення тривалості мареографічних спостережень, необхідної для дослідження вікових вертикальних рухів земної кори. Здійснено апроксимацію мареографічних часових серій рядами Фур'є, пояснено необхідність триваліших спостережень на певних територіях. Побудовано схему швидкостей вікових ВРЗК Європи на основі даних мареографічних і GNSS-спостережень. Виявлено та вивчено різниці у визначенні швидкостей ВРЗК Європи за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень. Під час аналізу цих різниць встановлено, що вони характерні для всієї території Європи. Причинами виникнення таких розбіжностей є зростання глобального середнього рівня моря, вплив солоності та вітрів.

У результаті виконаного дослідження було проведено реконструкцію вертикальних рухів земної кори на території північної частини Європи за даними тривалих мареографічних спостережень; досліджено зміну кінематичних параметрів кристалічних масивів, на яких розташовані відібрані для дослідження мареографи, залежно від вибраної середньої епохи спостережень і періоду усереднення

результатів мареографічних спостережень. Проведено ретроспективний аналіз зміни кінематичних параметрів досліджуваної території.

**Ключові слова:** вертикальний рух земної кори, мареограф, GNSS-станція, різниця швидкостей, реконструкція вертикальних рухів, Європа, тектонічний блок, кінематичні параметри.

### АННОТАЦІЯ

Досин С.И. Определение скоростей вековых вертикальных движений земной коры по данным мареографических и GNSS-наблюдений (на примере Европейского континента). – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 – геодезия, фотограмметрия и картография. – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2017.

В диссертационной работе выполнено исследование вековых вертикальных движений земной коры (ВДЗК) Европы на основе двух независимых методов, а именно: результатов мареографических и GNSS-наблюдений. Осуществлено описание и классификация факторов, влияющих на изменение уровня моря. Вычислено точность, с которой можно исследовать вековые движения земной коры по результатам мареографических наблюдений. Представлена методика выявления продолжительности мареографических наблюдений, необходимой для исследования вековых вертикальных движений земной коры. Осуществлен аппроксимацию мареографических временных серий рядами Фурье, объяснена необходимость длительных наблюдений на определенных территориях. Построена схема скоростей вековых ВДЗК Европы по данным мареографических и GNSS-наблюдений. Обнаружено и изучено различия в определении скоростей ВДЗК Европы с помощью мареографических и GNSS-наблюдений. При анализе этих различий установлено, что она характерна для всей территории Европы. Причиной возникновения таких разногласий является рост глобального среднего уровня моря, влияние солёности и ветров.

В результате выполненного исследования была проведена реконструкция вертикальных движений земной коры на территории северной части Европы по данным длительных мареографических наблюдений; исследовано изменение кинематических параметров кристаллических массивов, на котором расположены отобранные для исследования мареографы, в зависимости от выбранной средней эпохи наблюдений и периода усреднения результатов мареографических наблюдений. Проведен ретроспективный анализ изменения кинематических параметров исследуемой территории.

**Ключевые слова:** вертикальное движение земной коры, мареограф, GNSS-станция, разница скоростей, реконструкция вертикальных движений, Европа, тектонический блок, кинематические параметры.

### ANNOTATION

Dosyn S.I. Determining of the velocities of secular vertical crustal movements according tide gauge and GNSS-observations (the territory of Europe continent is taken as an example). – On the rights of manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences by specialty 05.24.01 – geodesy, photogrammetry and cartography. – Lviv Polytechnic National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

This thesis is devoted to the study of secular vertical crust movements velocities (VCMV) of Europe on the basis of two independent methods, namely tide gauge and GNSS observations results. The description and classification of factors affecting sea level change has been made. The precision with which the secular movement of the earth's crust according to the results of tide gauge observations can be explored has been calculated. A methodology to identify the duration of tide gauge observations required for studies of secular vertical movements of the earth's crust has been presented. Approximation of tide gauge time series with the help of Fourier series has been implemented, the need for long-term observations in certain areas has been explained. The diagram of the velocities of the secular vertical movements of the European crust on the basis of the tide gauge data and GNSS observations has been built. The differences in determining VCMV in Europe applying two independent methods: tide gauge and GNSS-observations are detected and investigated. As the result of the average crust movement velocity calculation applying tide gauge and GNSS-observations the interpolation of vertical crust movement velocities has been conducted, at points equally set-along the European coastline, their mean-square error has been determined. The research has been conducted separately: one has been based on tide gauge observation and the other has been based on GNSS-observations. Based on processing the results of tide gauge and GNSS-observations the difference  $\Delta$  (mm/year) between vertical crust movement velocities has been determined. Having analyzed these differences, it has been found that it is typical for the whole European territory. The main factor causing the appearance of  $\Delta$  is obviously the increase of absolute global sea level, which is manifested in tide gauge observations as well as salinity and wind impact.

In the result of this study the reconstruction 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 and averaging the results of tide gauge observations has been made.

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. In general, tectonic block kinematics is correlated with neo-tectonic movements depicted in geological sections. Performed methodology can be used for isentical research of other regions of world's coastline. It helps to study the historical development of endogenous processes and changes in the Earth gravitational field and to study the position of changing altitude geodetic network and sustainability of its systems.

**Keywords:** vertical movement of the earth's crust, tide gauge GNSS-station, difference of velocities, reconstruction of vertical movements, Europe, tectonic block, kinematic parameters.