

УДК 528.22+551.46

К. Р. ТРЕТЯК, С. І. ДОСИН*

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, *ел. пошта solomiya.dosyn@gmail.com

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТЕЙ ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ КОРИ БЕРЕГОВОЇ ЛІНІЇ ЄВРОПИ ЗА ДАНИМИ МАРЕОГРАФІЧНИХ ТА GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Мета. Мета виконаного дослідження – виявлення та дослідження розбіжностей у визначенні швидкостей вертикальних рухів земної кори (ВРЗК) Європи за допомогою двох незалежних методів – мареографічних та GNSS-спостережень. **Методика.** За результатами обчислення середніх швидкостей ВРЗК з використанням мареографічних ($V_{\text{мар}} \pm m_{V_{\text{мар}}}$) та GNSS-спостережень ($V_{\text{GNSS}} \pm m_{V_{\text{GNSS}}}$)

виконано інтерполяцію швидкостей вертикальних рухів ($V_{\text{мар}}^{\text{инт}}$ та $V_{\text{GNSS}}^{\text{инт}}$) в рівномірно розташованих точках уздовж берегової лінії Європи (через кожні 10 км) та визначено їхні середньоквадратичні похибки ($m_{V_{\text{мар}}^{\text{инт}}}$ та $m_{V_{\text{GNSS}}^{\text{инт}}}$). Дослідження проводились окремо за даними мареографічних спостережень і окремо –

за даними GNSS-спостережень. **Результати.** На основі опрацювання результатів мареографічних та GNSS-спостережень виявлено різницю Δ (мм/рік) між швидкостями ВРЗК. Під час аналізу цих різниць встановлено, що вона характерна для всієї території Європи. Найбільшого значення вона становить $2,6 \pm 0,8$ мм/рік на території Фенноскандії, найменшого – на території Нідерландів ($0,6 \pm 0,2$ мм/рік) та Балканського півострова ($0,6 \pm 0,1$ мм/рік). Тобто, Δ змінюється в межах від 0,6 до 2,6 мм/рік. Середня квадратична похибка визначення різниць m_{Δ} змінюється в межах від 0,1 до 0,9 мм/рік. Середнє значення Δ для території Європи становить $1,8 \pm 0,5$ мм/рік. Результати визначення розподілу Δ згруповано в чотири умовні блоки – території, для яких спостерігаються майже однакові в межах точності їх визначення значення середніх різниць Δ . Перший блок (I) – це територія Фенноскандії та Центральної Європи ($\Delta \pm m_{\Delta} = 2,4 \pm 0,6$ мм/рік), другий (II) – територія Західної Європи ($\Delta \pm m_{\Delta} = 0,7 \pm 0,2$ мм/рік), третій (III) – територія Великої Британії та Південної Європи ($\Delta \pm m_{\Delta} = 1,5 \pm 0,3$ мм/рік), четвертий (IV) – територія Балканського півострова ($\Delta \pm m_{\Delta} = 1,0 \pm 0,3$ мм/рік). Ця складова є систематичною, постійною в межах певних регіонів і є завжди додатною. Основним фактором, який спричиняє появу Δ , є, очевидно, зростання абсолютного глобального рівня моря, яке проявляється у мареографічних спостереженнях, а також вплив солоності та вітрів. **Наукова новизна.** У результаті виконаних досліджень з'являється можливість спільного урівноваження мареографічних і GNSS-спостережень для визначення швидкостей ВРЗК уздовж берегової лінії з урахуванням відповідної систематичної поправки Δ , а також можливість прогнозування швидкості ВРЗК. **Практична значущість.** У результаті виконаних досліджень встановлено систематичну різницю Δ між результатами визначення швидкостей ВРЗК за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень. Урахування цієї різниці дає можливість прогнозування зміни положення берегової лінії та зміни рівня моря, які мають важливий соціоекономічний наслідок для населення, яке проживає поблизу морських узбереж. Зміна положення берегової лінії також має вагомий вплив під час проектування та будівництва гідротехнічних споруд та портів на прибережних територіях.

Ключові слова: вертикальний рух земної кори, GNSS-станції, мареограф, різниця швидкостей вертикальних рухів.

Вступ

Вивчення сучасних рухів земної кори – одна з актуальних проблем науки про Землю, яка має вагомим теоретичне і практичне значення. Під вертикальними рухами земної кори (ВРЗК) розуміємо механічне переміщення точок земної кори, викликане ендегенними силами, що призводять до її деформації.

Сьогодні існують різноманітні методи спостережень за рухами земної кори, зокрема, їх досліджують за допомогою геодезичних, геофізичних, геоморфологічних і океанографічних методів.

Поява GNSS-станцій надала можливість проведення дослідження ВРЗК з великою точністю. Їх просторове розміщення дає змогу здійснювати моніторинг на глобальному і регіональному рівнях.

Систематичні спостереження за допомогою мареографів та футштоків дають можливість оцінювати зміни рівня моря, що, своєю чергою, допомагає прогнозувати, з урахуванням рельєфу, зміну берегової лінії. 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).

Останнім часом спостерігаємо глобальне зростання середнього рівня моря, спричинене глобальним потеплінням. Зростання середнього рівня моря фіксується в записях мареографів та результатах супутникової альтиметрії і відображається як систематична похибка під час визначення ВРЗК. Тобто, ми припускаємо, що існують розбіжності у визначенні швидкостей ВРЗК за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень, числові значення яких, найімовірніше, будуть близькими до значень зростання глобального середнього рівня моря. Для кожної окремої території Європи швидкість зростання глобального середнього рівня моря є різною, про що свідчать результати супутникової альтиметрії [Nerem R., 2001; Albain M., 2015] та звіти NOAA.

Першопричиною зростання рівня моря є глобальне потепління, яке вже призвело до декількох видимих наслідків, зокрема зростання середньої температури поверхні Землі [Morice C., 2012], теплоємності океану [Levitus S., 2000; Hobbs W., 2013], танення морського льоду [Wadhams P., 2011] і льодовиків [Cogley J., 2009; Cardner A., 2013], втрати льодовикових мас Гренландських та Антарктичних льодовикових щитів [Shepherd A., 2012]. Нагрівання океану призводить до термального розширення морських вод, і, відповідно, – зростання рівня моря. Аналогічно, вода з розталого материкового льоду в результаті досягає океанів і також призводить до зростання рівня моря.

Найбільші внески в зростання рівня моря роблять термальне розширення, спричинене нагріванням океанів, і втрата об'єму льоду, розташованого на суші (танення льодовиків, льодовикових покривів та льодовикових шапок).

Ще однією особливістю є те, що мареографи фіксують вертикальне зміщення пункту відносно поверхні геоїда по прямовисній лінії, а GNSS-приймачі – відносно поверхні референц-еліпсоїда по нормалі до нього. Тобто, вони мають різні відлікові поверхні. Але, враховуючи те, що швидкості є похідними від визначених висот, то значна частина систематичних похибок, пов'язаних з мареографічними та GNSS-вимірами компенсується у визначених швидкостях.

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 змогу відфільтрувати впливи нетектонічної природи. На основі усереднених мареографічних спостережень за певний проміжок часу є можливість визначати вікові рухи земної кори, які мають, як

правило, тектонічну природу. Що більший період усереднення, то точніше значення вікових ВРЗК [Третяк К., 2014].

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 континентів від величини абсолютного глобального зростання рівня моря (яке становить $1,8 \pm 0,5$ мм/рік [Bindoff N., 2007]) віднімали значення відносних трендів рівня моря, отриманих із 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.

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 GNSS-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 піддаються впливам десятирічних варіацій рівня моря (таких як, наприклад, Тихоокеанське десятирічне коливання). Для того, щоб це усунути, потрібні тривалі часові серії альтиметричних вимірювань.

Альтиметричні спостереження ведуться загалом лише 25 років [Cazenave A., 2004]. Цієї тривалості зовсім не достатньо для впевненого визначення вікових (тобто таких, які тривають 50 і більше років) 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

спутникової 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 розташована на південно-західному узбережжі Італії) за результатами геометричного нівелювання, а також за допомогою наземних фотознімків цієї території.

Ще однією ефективною технологією геодезичних вимірів, яка дає змогу будувати цифрові моделі рельєфу (ЦМР) і проводити моніторинг динаміки поверхні Землі за період між повторними зйомками з точністю, недосяжною під час використання лише поверхневих вимірювань – є InSAR. Ця технологія використовує методи радіолокаційної зйомки земної поверхні з космічних супутників, на яких встановлені антени з синтезованою апертурою [Лысков И., 2010].

Прикладами використання InSAR є: дослідження косейсмічних і постсейсмічних процесів [Foumelis M., 2009; Barbot S., 2008; Çakir Z., 2003], моніторинг динаміки льодовиків [Kumar V., 2009; Farina P., 2004; Colesanti C., 2006; Meisina C., 2007]. Дуже широкий список техногенних об'єктів моніторинга: області залягання нафтових і газових родовищ, просадки над шахтами, тунелями, моніторинг стабільності мостів.

У дослідженні [Brooks B., 2007] автори скомбінували результати вимірювання InSAR, результати мареографічних вимірювань та безперервні часові серії GPS-приймачів для визначення просторової зміни у ВРЗК уздовж узбережжя Лос-Анджелеса протягом останнього десятиліття і для визначення впливу просторої зміни ВРЗК на тренди відносного рівня моря. За результатами спостережень виявлено, що між гаванню Лос-Анджелеса і Ньюпорт-Біч середні тренди ВРЗК змінюються від $\sim 3,4$ до $-4,3$ мм/рік, відображаючи тим самим високий рівень видобування ґрунтових вод та нафти в цьому регіоні.

У роботі [Hsieh Ch., 2011] автори використовували DInSAR та PSInSAR для виявлення осідання земної кори на острові Тайвань у період від 1995 до 2000 року. Максимальна величина річного осідання у посушний сезон сягає до $-11,51$ см/рік і величина вертикальних рухів земної кори у вологий період є набагато повільнішою. Середні величини осідання у вологий і сухий періоди є $-0,31$ і $-3,37$ см/рік відповідно. Як результат, величина осідання у сухий період є на 3 см

більша, ніж у вологий період. DInSAR також може використовуватися для визначення зміщень земної поверхні та визначення деформацій, які виникають внаслідок осідання земної поверхні, землетрусів, вулканів та ін.

Мета

Метою виконаного дослідження є аналіз розбіжностей у визначенні ВРЗК на основі мареографічних та GNSS-спостережень на береговій лінії Європейського континенту та встановлення причини таких розбіжностей залежно від географічного розташування.

Вихідні дані

Предметом дослідження була берегова лінія Європи. На цій території наявна густа мережа перманентних GNSS-станцій та мареографів. На відібраній території деякі мареографи проводять свої спостереження ще з XIX ст., так створюють довгі ряди спостережень для опрацювання. Територія Європи знає різноманіття вертикальних рухів: Фенноскандія підіймається достатньо швидко, а південна територія Європи, навпаки, опускається.

Опрацювання часових серій та відбір мареографів проводились з використанням сайту <http://www.psmsl.org>, а GNSS-станцій – з використанням сайту Невадської геодезичної лабораторії NGL (Nevada Geodetic Laboratory) <http://geodesy.unr.edu/index.php>.

Ми відібрали станції мареографів, на яких ведуться спостереження більше ніж 30 років і мають безперервні часові ряди спостережень. Усі відібрані GNSS-станції розташовані вздовж берегової лінії. Мінімальна тривалість спостережень на GNSS-станціях становить чотири роки. Усі відібрані станції працюють у безперервному режимі.

Під час опрацювання результатів проводилась фільтрація відібраних мареографічних та GNSS-станцій, якщо їхні швидкості були аномальними. Тобто, вони значно відрізнялися від швидкостей інших станцій, які розташовані поблизу. Причиною цієї аномалії можуть бути локальні геолого-геоморфологічні умови, техногенні фактори або інші фактори, які впливають на результати вимірювань. Сумарна кількість усіх неврахованих мареографів – 10 (6,7 %), а GNSS-станцій – 18 (8,2 %) (по всій території Європи).

Великі за обсягом берегові лінії поділені на регіони, враховуючи їхні геолого-тектонічні характеристики. Прикладом таких регіонів є Фенноскандія, Велика Британія та Франція. Схематичне розташування відібраних станцій (мареографів та GNSS-станцій) на кожній з досліджуваних територій Європи зображено на рис. 1.

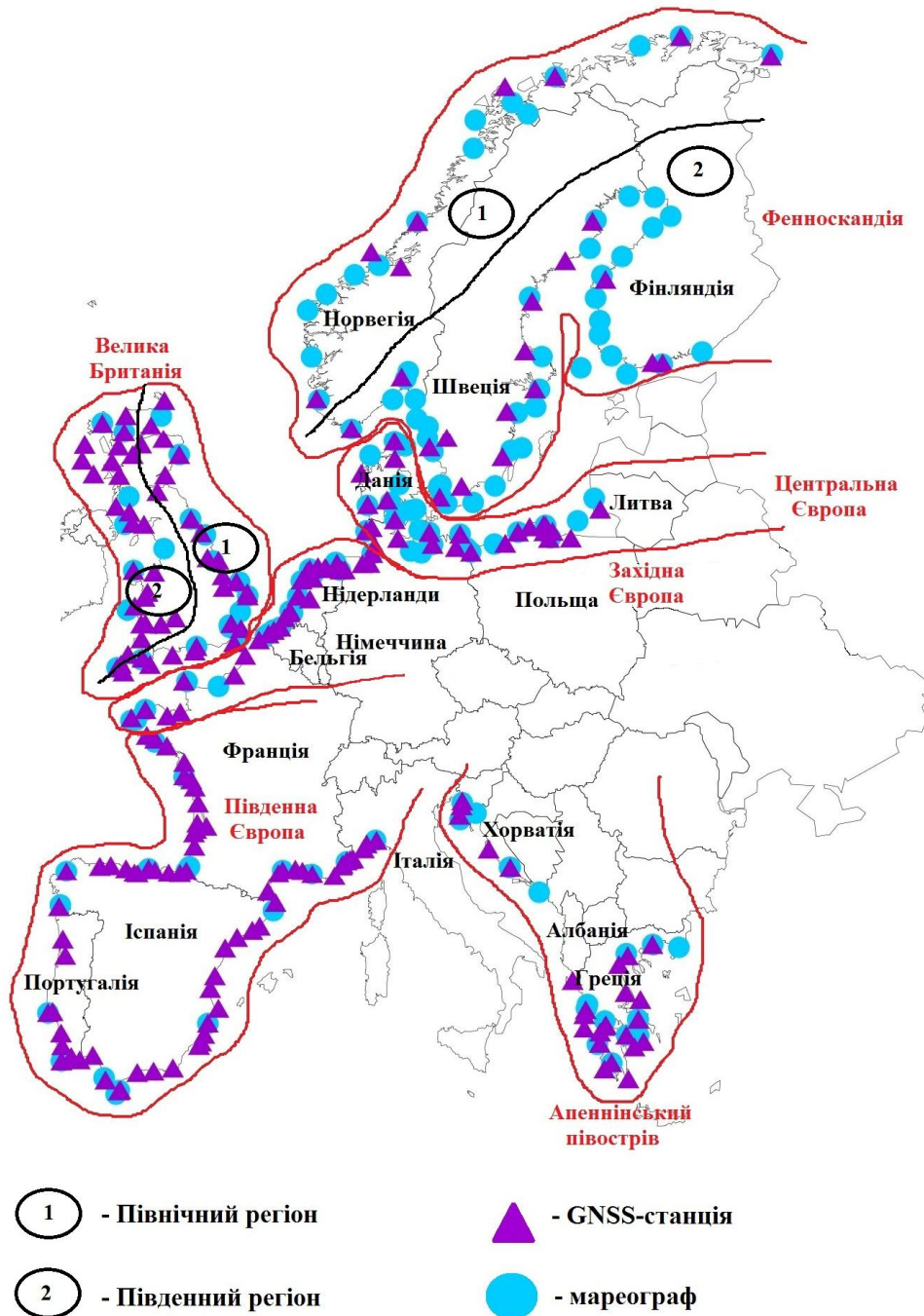


Рис. 1. Схема розташування відібраних мареографів та GNSS-станцій на території Європи
 Fig. 1. Location of selected tide gauges and GNSS-stations in Europe

Методика дослідження

Для проведення дослідження ми створили базу даних, яка містить характеристики мареографів та близько розташованих до них GNSS-станцій, а саме: широту та довготу станцій, середні швидкості ВРЗК, визначені за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень за весь період їхніх спостережень з оцінкою точності.

Середні швидкості ВРЗК, одержані за допомогою мареографічних спостережень $V_{\text{мар}}$,

та їхні середньоквадратичні похибки $m_{\text{мар}}$ визначались за наступними виразами (1) та (2):

$$h_{i_{\text{мар}}} = -V_{\text{мар}} t_{i_{\text{мар}}} + a_{\text{мар}}, \quad (1)$$

де $a_{\text{мар}}$ – невідомий коефіцієнт, $V_{\text{мар}}$ – невідома швидкість ВРЗК, одержана за даними мареографічних спостережень, $h_{i_{\text{мар}}}$ – відлік за мареографом на епоху $t_{i_{\text{мар}}}$.

Розв'язок цієї системи рівнянь за способом найменших квадратів дає змогу визначити швидкість руху земної кори $V_{\text{мар}}$ і коефіцієнт $a_{\text{мар}}$. Точність $m_{\text{мар}}$ визначення швидкості $V_{\text{мар}}$ з часової серії обчислювалась за допомогою рівняння (2):

$$m_{\text{мар}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{мар}}} [h_{i_{\text{мар}}} + V_{\text{мар}} t_{i_{\text{мар}}} - a_{\text{мар}}]^2}{n_{\text{мар}} - 1}}, \quad (2)$$

де $n_{\text{мар}}$ – кількість відліків.

У цій базі також містяться відомості про GNSS-станції, які розташовані поблизу відповідного мареографа, а саме: їхні назви, координати, тривалість спостереження, відстані до відповідного мареографа.

Швидкість ВРЗК, одержаної за допомогою GNSS-спостережень (V_{GNSS}) та точності її визначення (m_{GNSS}) обчислювалась за формулами (3) і (4):

$$h_{i_{\text{GNSS}}} = V_{\text{GNSS}} t_{i_{\text{GNSS}}} + a_{\text{GNSS}}, \quad (3)$$

$$m_{\text{GNSS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{GNSS}}} [h_{i_{\text{GNSS}}} - V_{\text{GNSS}} t_{i_{\text{GNSS}}} - a_{\text{GNSS}}]^2}{n_{\text{GNSS}} - 1}}, \quad (4)$$

Наступний етап дослідження полягає у інтерполяції швидкостей вертикальних рухів за даними мареографічних та GNSS-спостережень у довільній точці берегової лінії.

Для цього обчислена відстань від початкової станції (мареографа чи GNSS-станції, які відібрані для дослідження), до всіх наступних станцій (мареографа чи GNSS-станції) вздовж берегової лінії кожного окремого блоку. Для того, щоб визначити швидкість вертикального руху в довільній точці узбережжя на задану епоху та її середньоквадратичну похибку, скористаємося виразами (5)–(6). Ці розрахунки проводять окремо: виключно за даними мареографічних спостережень і окремо – за даними GNSS-спостережень.

$$V^{\text{інт}} = \frac{\sum \frac{V \cdot \Delta t}{S \cdot (t - t_{\text{сер}})}}{\sum \frac{\Delta t}{S \cdot (t - t_{\text{сер}})}}, \quad (5)$$

$$m^{\text{інт}} = \frac{\sum \frac{m \cdot \Delta t}{S \cdot (t - t_{\text{сер}})}}{\sum \frac{\Delta t}{S \cdot (t - t_{\text{сер}})}}, \quad (6)$$

де V – швидкість ВРЗК, визначена за допомогою мареографічних ($V_{\text{мар}}$) чи GNSS-спостережень (V_{GNSS}) (мм/рік); Δt – період спостережень на

мареографі чи GNSS-станції (рік); t – епоха, на яку визначаємо шукані параметри; $t_{\text{сер}}$ – середня епоха спостережень на мареографі чи GNSS-станції (рік); S – відстань від початкової станції до мареографа чи GNSS-станції (км); m – середньоквадратична похибка визначення швидкості ВРЗК, одержаної за допомогою мареографічних чи GNSS-спостережень (мм/рік).

Апробація методики

У результаті проведення досліджень, використовуючи формули (1)–(6), ми отримали для всієї території Європи значення швидкостей ВРЗК за допомогою мареографічних ($V_{\text{мар}}$) та GNSS-спостережень (V_{GNSS}) з їхніми середньоквадратичними похибками ($m_{\text{мар}}$, m_{GNSS}), а також інтерпольовані значення швидкостей ВРЗК за допомогою мареографічних ($V_{\text{мар}}^{\text{інт}}$) та GNSS-спостережень ($V_{\text{GNSS}}^{\text{інт}}$) через кожні 10 км вздовж берегової лінії території Європи з їхніми середньоквадратичними похибками ($m_{V_{\text{мар}}^{\text{інт}}}$ та $m_{V_{\text{GNSS}}^{\text{інт}}}$). Фрагмент значень швидкостей ВРЗК, визначених за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень, зображено в табл. 1.

Детально розглянемо результати визначення швидкостей ВРЗК для кожного з регіонів Європи.

Фенноскандія поділена на два регіони – (Північний та Південний) згідно зі своїми геологічними особливостями [Plant J., 2003]. Під блоком **Північний регіон Фенноскандії** розуміємо територію узбережжя Норвегії. Під блоком **Південний регіон Фенноскандії** розуміємо територію узбережжя Норвегії, Швеції та Фінляндії. Ще одним фактором, який впливає на поділ Фенноскандії, є те, що територія Норвегії виходить у Атлантичний океан, а Швеція та Фінляндія – у закрите Балтійське море.

На рис. 2 зображено схематичне розташування відібраних для дослідження мареографічних та GNSS-станцій на узбережжі Фенноскандії з визначеними швидкостями ВРЗК за допомогою мареографічних $V_{\text{мар}}$ та GNSS-спостережень V_{GNSS} , інтерпольованими швидкостями ВРЗК ($V_{\text{мар}}^{\text{інт}}$, $V_{\text{GNSS}}^{\text{інт}}$) та їхніми середньоквадратичними похибками ($m_{V_{\text{GNSS}}}$, $m_{V_{\text{мар}}}$, $m_{V_{\text{GNSS}}^{\text{інт}}}$, $m_{V_{\text{мар}}^{\text{інт}}}$). На цей рисунок також нанесено початкові станції (мареографічні чи GNSS-станції), від яких проводились обчислення відстаней. Стрілкою вказано напрямок, на основі якого обчислено відстані.

Таблиця 1

Фрагмент значень швидкостей ВРЗК, визначених за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень для території південної Європи (середня епоха – 2000 рік).

Table 1

Fragment of VCMV velocity values determined via tide gauge and GNSS-observations for the southern Europe territory (middle epoch – year of 2000)

Станція	Відстань, км	V_{GNSS} , мм/рік	$V_{мар}$, мм/рік	m_{GNSS} , мм/рік	$m_{мар}$, мм/рік	Інтерпольована відстань, км	$V_{GNSS}^{інт}$, мм/рік	$V_{мар}^{інт}$, мм/рік	$m_{V_{GNSS}^{інт}}$, мм/рік	$m_{V_{мар}^{інт}}$, мм/рік
KONE	0	-0,15	–	0,08	–	10	-0,44	-2,05	0,06	0,30
PL0E	37,91	-0,71	–	0,03	–	20	-0,53	-2,11	0,05	0,31
1247	49,32	–	-2,65	–	0,34	30	-0,61	-2,21	0,04	0,31
SARZ	101,76	-0,18	–	0,07	–	40	-0,68	-2,37	0,04	0,32
MACH	196,72	-0,17	–	0,07	–	50	-0,58	-2,62	0,05	0,34
1747	250,29	–	-3,51	–	0,67	60	-0,52	-2,34	0,05	0,32

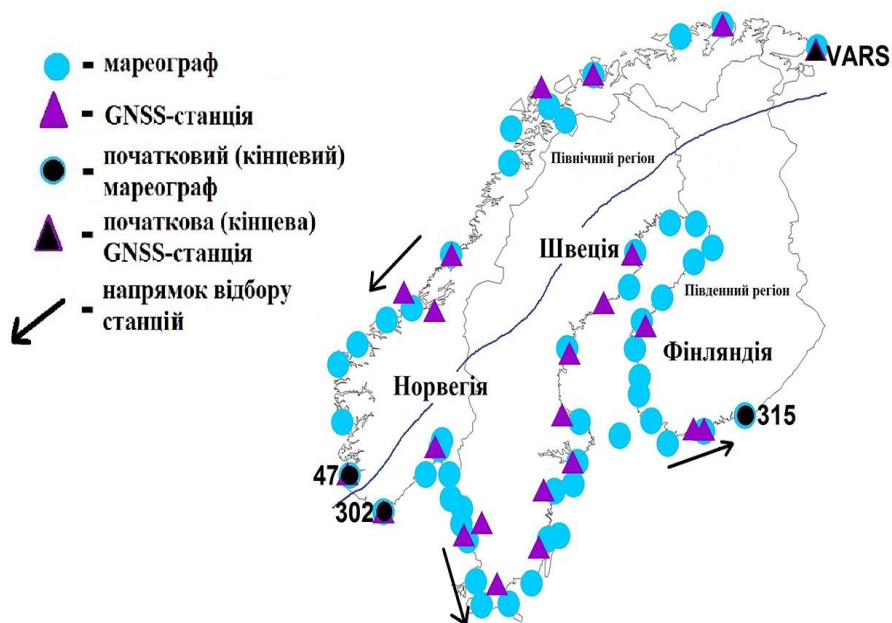


Рис. 2. Розташування відібраних для дослідження мареографічних та GNSS-станцій на узбережжі Фенноскандії

Fig. 2. Location of selected for study tide gauges and GNSS-stations on the coast of Fennoscandia

На рис. 3 подано результати визначення V_{GNSS} , $V_{мар}$, $V_{GNSS}^{інт}$, $V_{мар}^{інт}$ з їхніми середньоквадратичними похибками ($m_{V_{GNSS}}$, $m_{V_{мар}}$, $m_{V_{GNSS}^{інт}}$, $m_{V_{мар}^{інт}}$) для регіону Фенноскандії.

На рис. 3, а, з зображені розподіл вимірних швидкостей V_{GNSS} , $V_{мар}$ зі середньоквадратичними похибками $m_{V_{GNSS}}$, $m_{V_{мар}}$, які отримані за допомогою GNSS-спостережень та мареографічних спостережень у порядку їх розташування на станціях уздовж берегової лінії. Значення

швидкостей V_{GNSS} , $V_{мар}$ для Північного регіону (рис. 3, а) змінюється в межах від -1,2 мм/рік до 3,98 мм/рік, для Південного (рис. 3, з) – від -1,26 мм/рік до 11,12 мм/рік.

Середньоквадратичні похибки визначення швидкості $m_{V_{GNSS}}$, $m_{V_{мар}}$ для Північного регіону (рис. 3, а) змінюється від 0,021 мм/рік до 0,43 мм/рік, для Південного (рис. 3, з) – від 0,01 мм/рік до 0,57 мм/рік.

Для Північного регіону $V_{GNSS}^{інт}$ змінюються в межах від 1,24 мм/рік до 3,96 мм/рік, для Південного – від 2,05 мм/рік до 11,00 мм/рік.

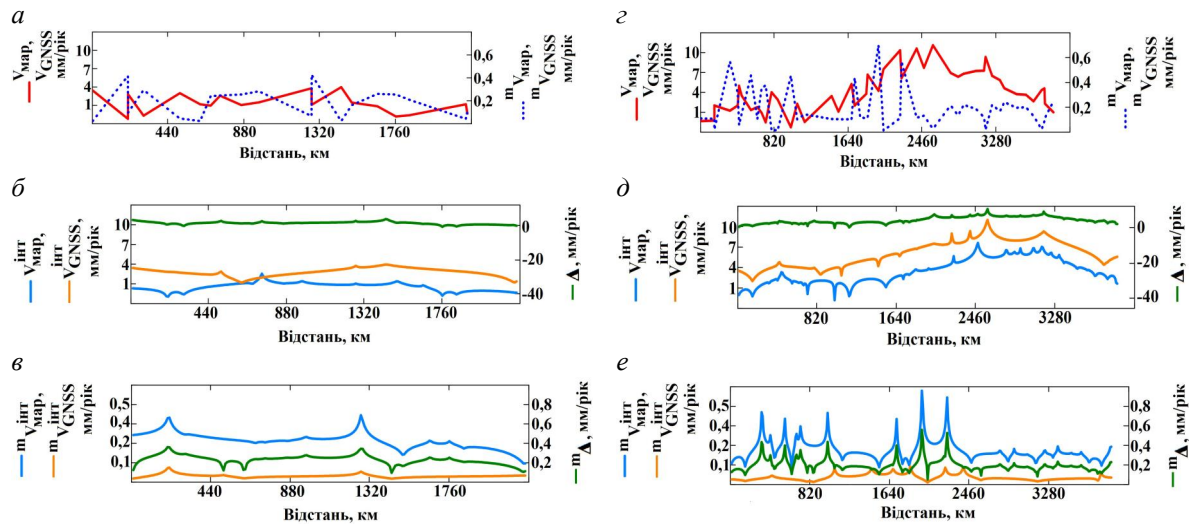


Рис. 3. Визначення V_{GNSS} , $V_{мар}$, V_{GNSS}^{int} , $V_{мар}^{int}$ з їхніми середньоквадратичними похибками

$m_{V_{GNSS}}$, $m_{V_{мар}}$, $m_{V_{GNSS}^{int}}$, $m_{V_{мар}^{int}}$ для Фенноскандії

Fig. 3. Determination of V_{GNSS} , V_{TG} , V_{GNSS}^{int} , V_{TG}^{int} with their mean square error

$m_{V_{GNSS}}$, $m_{V_{TG}}$, $m_{V_{GNSS}^{int}}$, $m_{V_{TG}^{int}}$ for the territory of Fennoscandia

На рис. 3, в, е зображено значення середньоквадратичної похибки відповідних швидкостей ($m_{V_{GNSS}^{int}}$ і $m_{V_{мар}^{int}}$). Для Північного регіону $m_{V_{мар}^{int}}$ змінюється в межах від 0,12 мм/рік до 0,42 мм/рік, для Південного – від 0,11 мм/рік до 0,58 мм/рік.

Для Північного регіону $m_{V_{GNSS}^{int}}$ змінюються в межах від 0,02 мм/рік до 0,09 мм/рік, для Південного – від 0,01 мм/рік до 0,11 мм/рік.

Як видно з аналізу рис. 3, б, в, різниці між швидкостями V_{GNSS}^{int} та $V_{мар}^{int}$ є сталими і додатними вздовж усього досліджуваного регіону. У певному місці узбережжя Північного регіону (приблизно на 620 км) вони є такими, що дорівнюють нулю, тобто збігаються (рис. 3, б). Причиною цього можуть слугувати особливі геологічні умови, на яких розташовані мареографи та GNSS-станції. Початковою точкою, від якої відраховувались відстані в Північному регіоні була GNSS-станція VARS, а кінцевою – мареограф № 47.

Південний регіон Фенноскандії характеризується густою мережею відібраних мареографічних та GNSS-станцій. З аналізу швидкостей бачимо, що найбільшого підймання зазнає район Ботнічної затоки (~10 мм/рік).

Постійне додатне значення у визначенні швидкостей вертикальних рухів земної кори за допомогою двох методів наявне вздовж цілого досліджуваного узбережжя. Початковою точкою, від якої відраховувались відстані в Південному

регіоні, був мареограф № 302, а кінцевою – мареограф № 315.

На рис. 4 зображено результати визначення V_{GNSS} , $V_{мар}$, V_{GNSS}^{int} , $V_{мар}^{int}$ з їхніми середньоквадратичними похибками ($m_{V_{GNSS}}$, $m_{V_{мар}}$, $m_{V_{GNSS}^{int}}$, $m_{V_{мар}^{int}}$) для решти регіонів Європи.

Під блоком **Центральна Європа** розуміємо територію узбережжя Латвії, Польщі, Німеччини і Данії; **Західна Європа** – узбережжя Німеччини, Нідерландів, Бельгії та Франції; **Північний регіон Великої Британії** – узбережжя Великої Британії; **Південний регіон Великої Британії** – західну територію узбережжя Великої Британії; **Південна Європа** – узбережжя Франції, Іспанії, Португалії та Італії; **Балканський півострів** – узбережжя Італії, Хорватії, Албанії та Греції.

Мареографи, розміщені на території узбережжя Італії, не мають довготривалих записів даних. Тривалість спостережень тут становить 13 років (2001–2014 роки).

У табл. 2 подані статистичні дані про кількість відібраних для дослідження мареографічних та GNSS-станцій, тривалість спостережень на них та середні відстані між ними для всієї території Європи.

З аналізу рис. 1–4 і табл. 2 видно, що розташування відібраних мареографічних та GNSS-станцій по всій території Європи не є рівномірним.

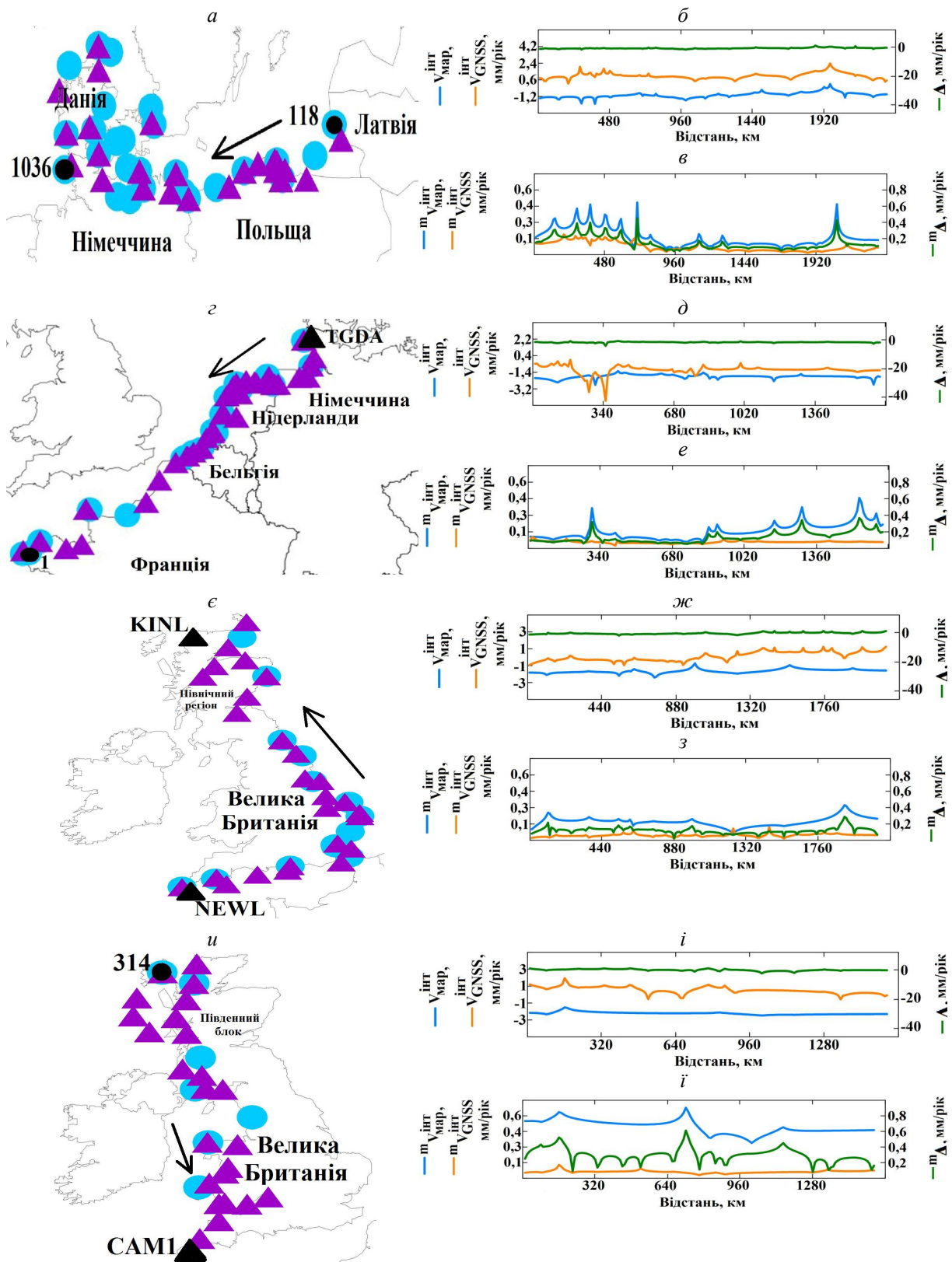
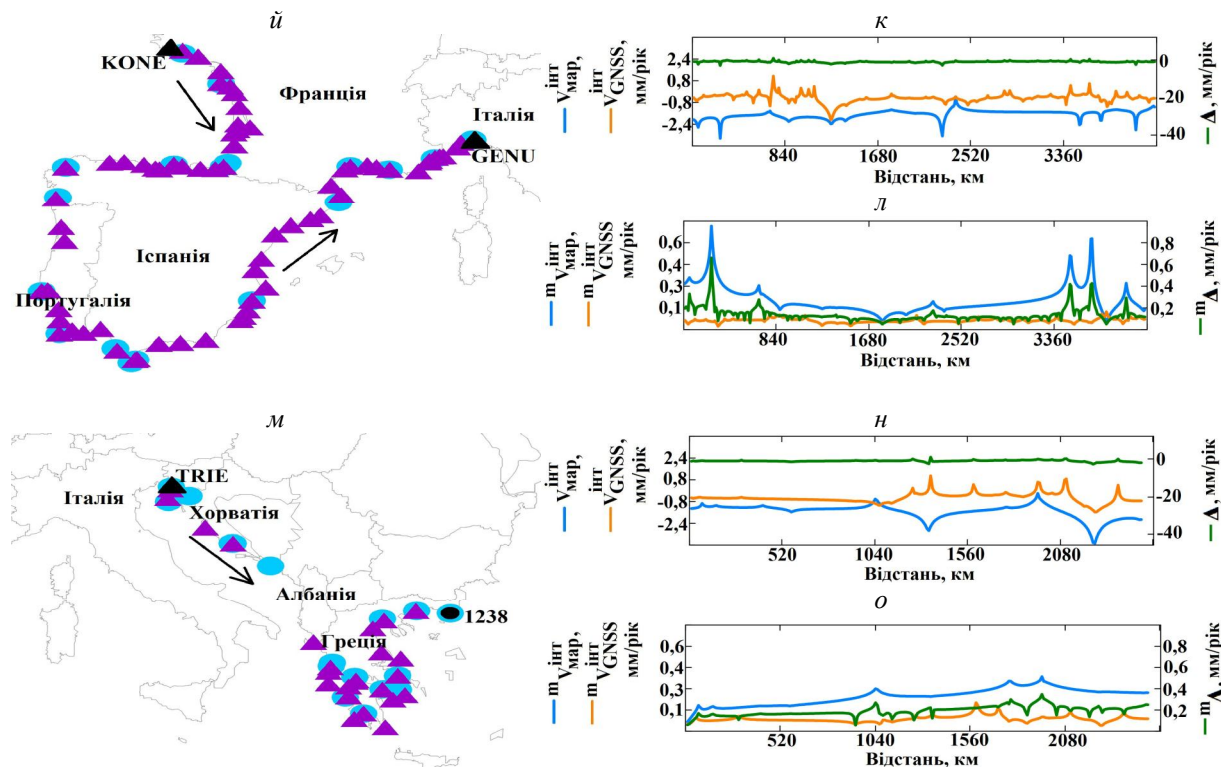


Рис. 4. Результати визначення V_{GNSS}^{int} , $V_{мар}^{int}$ з їхніми середньоквадратичними похибками $m_{V_{GNSS}^{int}}$, $m_{V_{мар}^{int}}$ для решти регіонів Європи

Fig. 4. Results of determination V_{GNSS}^{int} , V_{TG}^{int} with their mean square error $m_{V_{GNSS}^{int}}$, $m_{V_{TG}^{int}}$ for other regions in Europe



Продовження рис. 4. Результати визначення V_{GNSS}^{int} , V_{mar}^{int}

з їхніми середньоквадратичними похибками $m_{V_{GNSS}^{int}}$, $m_{V_{mar}^{int}}$ для решти регіонів Європи

Fig. 4. Results of determination V_{GNSS}^{int} , V_{TG}^{int} with their mean square error

$m_{V_{GNSS}^{int}}$, $m_{V_{TG}^{int}}$ for other regions in Europe

Таблиця 2

Статистичні дані про кількість відібраних мареографічних та GNSS-станцій, тривалість спостережень на них та середні відстані між ними для території Європи

Table 1

Statistical data on the number of selected tide gauge and GNSS stations, duration of observations on them, and the average distance between them for the Europe territory

Територія		Кількість мареографів	Середня відстань між мареографами (км)	Кількість GNSS-станцій	Середня відстань між GNSS-станціями (км)	Середня тривалість мареографічних спостережень (роки)	Середня тривалість GNSS-спостережень (роки)
Фенно-скандія	Північний регіон	15	120,08	8	309,52	64,93	10,84
	Південний регіон	35	84,64	15	94,10	84,19	10,66
Центральна Європа		26	78,77	24	60,49	97,38	7,60
Західна Європа		19	58,36	34	45,42	95,00	7,07
Велика Британія	Північний регіон	14	57,77	28	69,81	59,93	9,65
	Південний регіон	9	73,92	27	73,50	42,11	7,92
Південна Європа		18	74,30	68	62,45	59,78	7,46
Балканський півострів		18	72,47	25	64,91	53,89	6,70

Кілікість відібраних мареографів є більшою на узбережжі північної Європи, а GNSS-станцій – навпаки: більше на узбережжі південної Європи.

Середня відстань між відібраними мареографами по всій Європі змінюється від 57,77 км до 120,08 км.

Середня відстань між відібраними GNSS-станціями по всій Європі змінюється від 45,42 км до 309,52 км.

Середня тривалість спостережень, очевидно, є довшою на мареографах і змінюється від 42,11 років до 97, 38 років. Середня тривалість GNSS-спостережень змінюється від 6,70 років до 10,84 років.

Статистичний аналіз результатів визначення V_{GNSS}^{int} , V_{map}^{int} з їхніми середньоквадратичними похибками $m_{V_{GNSS}^{int}}$, $m_{V_{map}^{int}}$ для виділених регіонів Європи подамо у вигляді табл. 3.

Таблиця 3

Статистичний аналіз результатів визначення V_{GNSS}^{int} , V_{map}^{int} для виділених регіонів Європи

Table 1

Statistical analysis of V_{GNSS}^{int} and V_{map}^{int} determining results for the selected regions in Europe

Назва регіону	Зміна інтерпольованих швидкостей V_{map}^{int} (мм/рік)		Зміна інтерпольованих швидкостей V_{GNSS}^{int} (мм/рік)	
	від	до	від	до
Північний регіон Фенноскандії	-0,92±0,12	2,56±0,42	1,24±0,02	3,96±0,09
Південний регіон Фенноскандії	-0,75±0,11	7,62±0,58	2,05±0,01	11,00±0,11
Центральна Європа	-1,98±0,45	-0,15±0,04	0,21±0,02	2,38±0,18
Західна Європа	-2,75±0,43	-1,27±0,06	-4,50±0,10	-0,04±0,03
Північний регіон Великої Британії	-2,40±0,30	-0,72±0,07	-0,93±0,02	0,61±0,11
Південний регіон Великої Британії	-2,47±0,63	-1,51±0,32	-0,55±0,03	1,95±0,12
Південна Європа	-3,43±0,67	-0,40±0,05	-2,06±0,12	1,16±0,02
Балканський півострів	-3,86±0,36	-0,19±0,06	-1,55±0,04	1,10±0,19

За результатами табл. 3 виконано розразунок середніх різниць Δ (мм/рік) між значеннями інтерпольованих швидкостей ВРЗК, одержаних за допомогою GNSS-спостережень та інтерпольованих швидкостей ВРЗК, одержаних за допомогою мареографічних спостережень ($\Delta = V_{GNSS}^{int} - V_{map}^{int}$) і наведено їх оцінку точності (m_{Δ}) (мм/рік) (табл. 4). Вказано територію та довжину берегової лінії, яка охоплює ці середні різниці Δ . У зв'язку з тим, що на території Європи існують аномальні точки, в яких інтерпольовані значення швидкостей ВРЗК, одержані за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень, збігаються (як приклад – рис. 3, б), то територіально ми поділили всю Європу на окремі зони, для яких є прояв постійних різниць Δ (мм/рік). Початкова і кінцева точки таких зон збігів з розташуванням мареографів чи GNSS-станцій (чотирма латинськими великими літерами

позначено GNSS-станцію, а цифрами – мареограф) (рис. 5).

Результати визначення розподілу Δ узагальнено в чотири умовні блоки – території, для яких спостерігаються майже однакові в межах точності їх визначення значення середніх різниць Δ . Перший блок (I) – це територія Фенноскандії та Центральної Європи, другий блок (II) – територія Західної Європи, третій блок (III) – територія Великої Британії та Південної Європи, четвертий блок (IV) – територія Апеннінського півострова.

На карту території Європи нанесено середні різниці між значеннями інтерпольованих швидкостей ВРЗК, одержаних за допомогою GNSS-спостережень, та інтерпольованих швидкостей ВРЗК, одержаних за допомогою мареографічних спостережень $\Delta = V_{GNSS}^{int} - V_{map}^{int}$ (мм/рік) (рис. 5). Також показано чотири умовні блоки з їхніми значеннями середніх різниць Δ .

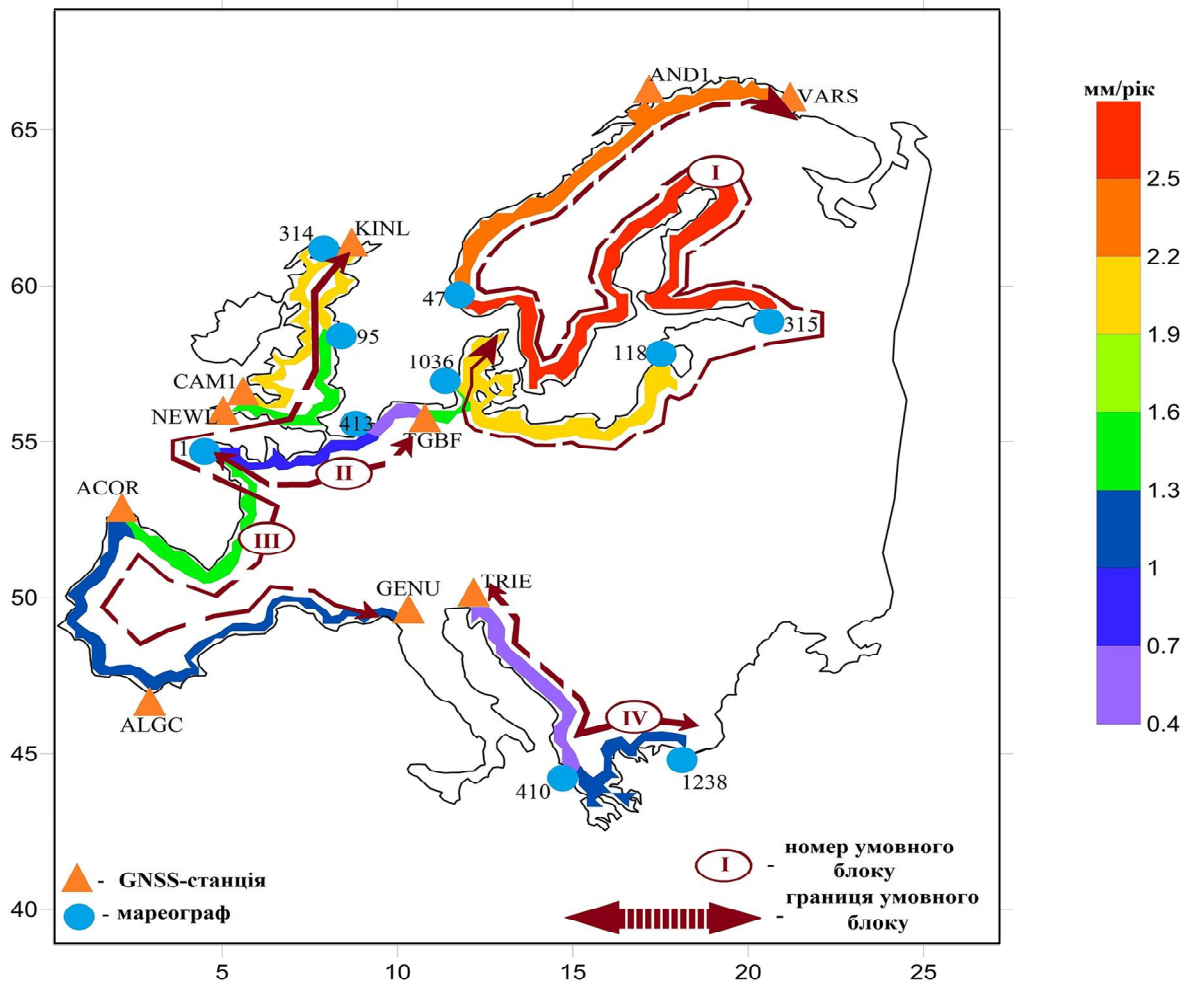


Рис. 5. Розподіл середніх різниць Δ (мм/рік) уздовж берегової лінії Європи з виділеними чотирма умовними блоками
Fig. 5. Distribution of mean differences Δ (mm/year) along the coastline of Europe with four selected arbitrary units

Як видно з аналізу рис. 5, найбільші розбіжності (до 2,5 мм/рік) у визначенні ВРЗК за допомогою GNSS-спостережень та мареографічних спостережень характерні для півночі узбережжя Європи, найменші (до 0,6 мм/рік) – узбережжя території Нідерландів, Хорватії, Албанії, частково – Бельгії, Італії (північно-східна частина) та Греції (північно-західна частина). Числові характеристики регіонів з постійною середньою різницею $\Delta \pm m_{\Delta}$ уздовж берегової лінії Європи та чотирьох умовних блоків приведено в табл. 4. Територія (1036-TGBF: 230 км), вздовж узбережжя якої спостерігається аномальне значення $\Delta \pm m_{\Delta}$, не входить до складу чотирьох умовних блоків.

З аналізу табл. 4 бачимо, що найбільше значення середніх різниць Δ (мм/рік) спостерігається на території Фенноскандії ($2,6 \pm 0,8$ мм/рік), а найменше значення – на території Нідерландів ($0,6 \pm 0,2$ мм/рік) та Балканського півострова ($0,6 \pm 0,1$ мм/рік). Тобто,

середні різниці змінюються в межах від 0,6 (узбережжя Середземного моря) до 2,6 мм/рік (узбережжя Атлантичного океану). Оцінка точності середніх різниць m_{Δ} – від 0,1 до 0,9 мм/рік. Середнє значення для території Європи становить $1,8 \pm 0,5$ мм/рік. Оцінка точності (m_{Δ}) одержаних середніх різниць Δ є, як мінімум, у 3 рази меншою, ніж самі значення Δ . Тобто, ступінь достовірності визначення Δ є досить високим.

Значення $\Delta \pm m_{\Delta}$ умовно виділених чотирьох блоків змінюється в межах від 0,7 до 2,4 мм/рік і становить: I – $2,4 \pm 0,6$ мм/рік, II – $0,7 \pm 0,2$ мм/рік, III – $1,5 \pm 0,3$ мм/рік, IV – $1,0 \pm 0,3$ мм/рік.

Для кожної частини території Європи характерне більше значення інтерпольованої швидкості ВРЗК, визначене за допомогою GNSS-спостережень, ніж за допомогою мареографічних спостережень. Середні різниці Δ (мм/рік) є завжди додатними і є практично систематичними.

Таблиця 4

Числові характеристики отриманих середніх різниць $\Delta \pm m_{\Delta}$ вздовж узбережжя Європи та в межах чотирьох умовних блоків з довжиною берегової лінії (км), яка охоплює ці різниці

Table 4

Numerical characteristics of the obtained mean differences $\Delta \pm m_{\Delta}$ along the coast of Europe and within four set units with the length of coastline (km), covering these differences

Регіон та початкова і кінцева точка берегової лінії, охоплена цими різницями	$\Delta \pm m_{\Delta}$ (мм/рік)	$\Delta \pm m_{\Delta}$ умовних блоків(мм/рік)
<i>Побережжя Атлантичного океану</i>		
Норвегія: VARS-AND1 (620 км)	2,4±0,9	I умовний блок 2,4±0,6
Норвегія: AND1-47 (1560 км)	2,3±0,7	
Норвегія-Швеція-Фінляндія: 47-315 (3920 км)	2,6±0,8	
Латвія-Російська Федерація-Польща-Німеччина-Данія: 118-1036 (2340 км)	2,1±0,3	
Німеччина: 1036-TGBF (230 км)	1,4±0,5	II умовний блок 0,7±0,2
Німеччина-Нідерланди-Бельгія: TGBF-413 (420 км)	0,6±0,2	
Бельгія-Франція: 413-1 (890 км)	0,8±0,2	
Велика Британія: NEWL-95 (990 км)	1,4±0,3	III умовний блок 1,5±0,3
Велика Британія: 95-KINL (1130 км)	2,1±0,4	
Велика Британія: 314-CAMI (1550 км)	2,1±0,4	
Франція-Іспанія: 1-ACOR (1250 км)	1,5±0,4	
Іспанія-Португалія-Іспанія: ACOR-ALGC (1130 км)	1,1±0,3	
<i>Побережжя Середземного моря</i>		
Іспанія-Франція-Італія: ALGC-GENU (1800 км)	1,1±0,3	IV умовний блок 1,0±0,3
Італія-Хорватія-Боснія і Герцоговина-Монтенегро-Греція: TRIE-410 (1030 км)	0,6±0,1	
Греція: 410-1238 (1500 км)	1,3±0,5	
Середнє значення по Європі		1, 8±0,5

Аналіз отриманих результатів

На рис. 6 зображені тренди зростання абсолютного середнього рівня моря, отримані за допомогою результатів супутникової альтиметрії з нанесеними середніми різницями Δ (мм/рік).

Першопричиною появи Δ є зростання глобального середнього рівня моря. Розбіжності у визначенні швидкостей ВРЗК за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень є близькими до значень зростання глобального середнього рівня моря.

Аномальні значення зростання чи спадання середнього рівня моря, які вказані на рис. 6, можна пояснити систематичними змінами тиску на певних територіях, які призводять до утворення NOA (North-Atlantic Oscillation) та PDO (Pacific Decadal Oscillation). Північно-Атлантичне коливання характеризується різницею тиску між двома центрами аномалій тиску, перший з яких розташований над Ісландією (Ісландський мінімум), а інший, з протилежним знаком – біля Канарських островів (Азорський максимум). Оскільки Балтійське море – це напівзакрита територія, то тут вплив NAO [Johansson M., 2003; Johansson M., 2004] і південних вітрів [Johansson M., 2012] є

помітним. Дослідження [Zhongwei Y., 2004] продемонстрували взаємозв'язок між NAO і рівнем моря північноєвропейського узбережжя. Більша частина північної Європи має додатний кореляційний зв'язок між збільшеними рівнями моря і сильнішим впливом NAO, який чіткіше проявляється в зимовий період. На південно-західному узбережжі Англії, навпаки, панує від'ємний кореляційний зв'язок.

Аномальні відхилення також можуть бути спричинені впливом течій [Pugh D., 1987], за рахунок яких змінюється і солоність води [Antonov J., 2002], впливом Гольфстріму [Tal E., 2016]. У дослідженні [Wahl T., 2013] автори визначали тренди рівня моря та їхні середньоквадратичні відхилення за допомогою мареографічних спостережень та результатів супутникової альтиметрії на території Північного моря. Проаналізувавши середньоквадратичні відхилення, отримані з двох незалежних джерел даних, виявилось, що значні міжрічні варіації для південно-східної частини Північного моря (територія Данії, Німеччини, Нідерландів і Бельгії) спричинені дією західних вітрів. Ці вітри можуть змінювати свій напрямок, стаючи екваторіальними вітрами, а також свою силу. Цим також можна пояснити аномальне спадання глобального середнього рівня моря.

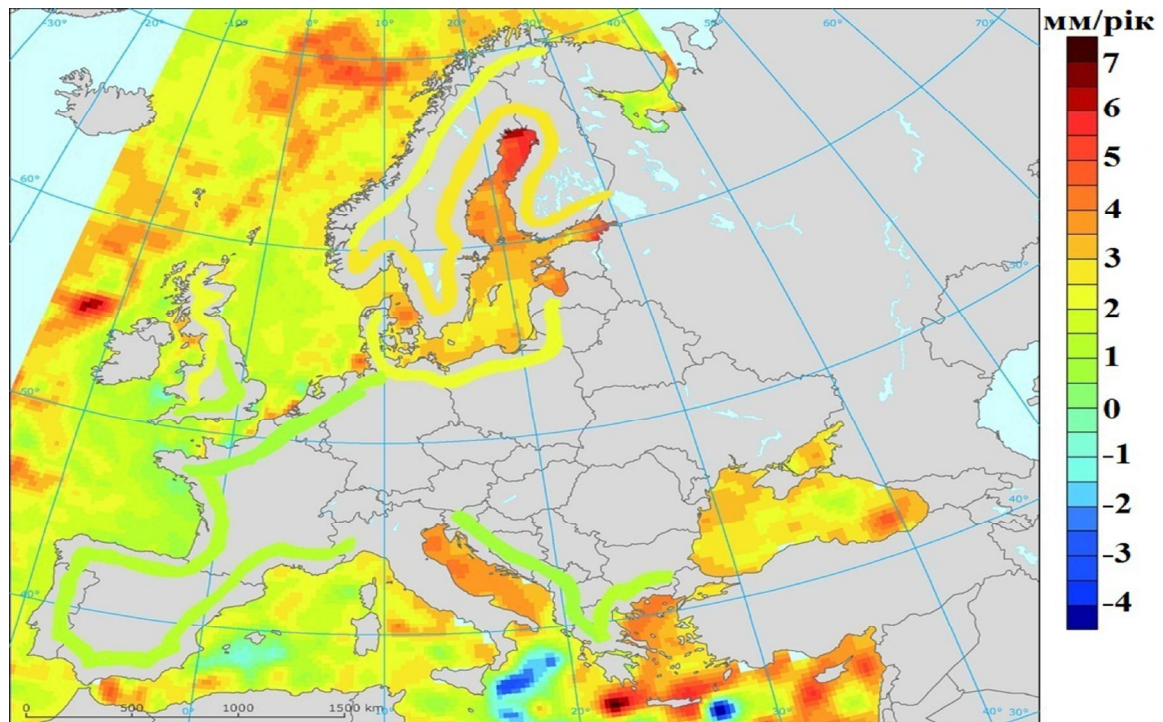


Рис. 6. Тренди абсолютного глобального зростання рівня моря (мм/рік), отримані за допомогою результатів супутникової альтиметрії (1992–2013 рр.) з нанесеними середніми різницями Δ (мм/рік)

Fig. 6. Trends of absolute global sea-level rise (mm/year) derived from the results of satellite altimetry (1992–2013) with mean differences Δ (mm/year)

Наукова новизна і практичне значення

У результаті виконаних досліджень встановлено систематичну складову між результатами визначення вертикальних рухів земної кори за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень. Ця складова є систематичною і має додатне значення. Основним фактором, який це спричиняє, є зростання абсолютного глобального рівня моря. Точність визначення систематичної складової є достатньою для того, щоб підтвердити вплив цих факторів.

У результаті виконаних досліджень з'являється можливість спільного урівноваження мареографічних і GNSS-спостережень для визначення швидкостей ВРЗК уздовж берегової лінії Європи з урахуванням або з визначенням відповідної систематичної поправки в різниці швидкостей, яка отримана на основі довготривалих вимірів. А також можливість прогнозування визначення швидкості ВРЗК. Прогнозування зміни рівня моря має важливий соціоекономічний наслідок для населення, яке проживає поблизу морських узбережь. Зміна положення берегової лінії також має вагомий вплив під час проектування та будівництва гідротехнічних споруд та портів на прибережних територіях.

Висновки

На основі окремого опрацювання результатів GNSS-спостережень та мареографічних спосте-

режень виявлено різницю Δ між швидкостями визначення ВРЗК. Під час аналізу цих різниць встановлено, що вона характерна для всієї берегової лінії території Європи і є завжди додатною. Найбільшого значення Δ становить $2,6 \pm 0,8$ мм/рік на береговій лінії Фенноскандії (узбережжя Атлантичного океану), найменшого – на береговій лінії Нідерландів ($0,6 \pm 0,2$ мм/рік) та Балканського півострова ($0,6 \pm 0,1$ мм/рік) (узбережжя Середземного моря). Тобто, середні різниці змінюються в межах від 0,6 до 2,6 мм/рік. Середньоквадратична похибка середніх різниць m_{Δ} змінюється в межах від 0,1 до 0,9 мм/рік. Середнє значення для узбережжя Європи становить $1,8 \pm 0,5$ мм/рік.

Результати визначення розподілу Δ узагальнено в чотири умовні блоки – території, для яких спостерігаються майже однакові в межах точності їх визначення значення середніх різниць Δ . – території, в межах яких спостерігаються подібні значення різниць Δ . Перший блок (I) – це територія Фенноскандії та Центральної Європи ($\Delta \pm m_{\Delta} = 2,4 \pm 0,6$ мм/рік), II – територія Західної Європи ($\Delta \pm m_{\Delta} = 0,7 \pm 0,2$ мм/рік), третій (III) – територія Великої Британії та Південної Європи ($\Delta \pm m_{\Delta} = 1,5 \pm 0,3$ мм/рік), четвертий (IV) – територія Балканського півострова ($\Delta \pm m_{\Delta} = 1,0 \pm 0,3$ мм/рік).

Різниці $\Delta \epsilon$ є систематичними і додатне значення. Їх необхідно враховувати за спільного визначення швидкостей ВРЗК, визначених за допомогою мареографічних та GNSS-спостережень. Основним фактором, який спричиняє появу різниць $\Delta \epsilon$ є зростання абсолютного глобального рівня моря, а також вплив солоності та вітрів.

Література

- Лысков И. А., Мусихин В. В., Кашников Ю. А., 2010, Мониторинг деформационных процессов земной поверхности методами радарной интерферометрии. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. № 5, с. 11–16.
- Третьяк К. Р., Досин С. І., 2014, Реконструкція вертикальних рухів земної кори за даними мареографічних спостережень. Геодинаміка, 2(17), с. 7–29.
- Ablain, M., Cazenave, A. et al., 2015, Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project. *Ocean Science*, 11, 67–82, doi:10.5194/os-11-67-2015.
- Antonov, J. I., Levitus, S. and Boyer, T. P., 2002, Steric sea level variations during 1957–1994: Importance of salinity. *Journal of Geophysical Research* 107(C12), 8013, doi:10.1029/2001JC000964.
- Barbot, S., Hamiel, Y., Fialko, Y., 2008, Space geodetic investigation of the coseismic and postseismic deformation due to the 2003 Mw7.2 Altai earthquake: Implications for the local lithospheric rheology. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, B03403, doi:10.1029/2007JB005063.
- Bindoff, N. L. et al., 2007, Observations: oceanic climate and sea level, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. L., Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA.
- Bingley, R. M., Dodson, A. H., Penna, N. T., Teferle, F. N. and Baker, T. F., 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(PART 1), p. 9–20.
- Bouin, M. N. and Wöppelmann, G., 2010, Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation. *Geophysical Journal International*, 180, p. 193–209. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04411.x
- Brooks B. A., Merrifield, M. A., Foster, J., Werner, C. L., Gomez, F., Bevis, M. and Gill, S., 2007, Space geodetic determination of spatial variability in relative sea level change, Los Angeles basin. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L01611, doi:10.1029/2006GL028171.
- Çakir, Z., Chabaliar, J.-B., Armijo, R., Meyer, B., Barka, A., Peltzer, G., 2003, Coseismic and early post-seismic slip associated with the 1999 Izmit earthquake (Turkey), from SAR interferometry and tectonic field observations. *Geophysical Journal International*. doi: 10.1046/j.1365-246X.2003.02001.x.
- Cazenave, A. and Nerem, R. S., 2004, Present-day sea level change: observations and causes. *Reviews of Geophysics* 42, RG3001, doi:10.1029/2003RG000139.
- Cogley, J. C., 2009, Geodetic and direct mass balance measurements: Comparison and joint analysis, *Annals of Glaciology*, No. 50, p. 96–100, doi:10.3189/172756409787769744
- Colesanti, C., Wasowski, J., 2006, Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry. *Engineering Geology*, No. 88, p. 173–199.
- Farina, P., Moretti, S., Colombo, D., Fumagalli A., Manunta P., 2004, Landslide risk analysis by means of remote sensing techniques: results from the ESA/SLAM project. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'04. Proceedings IEEE International*.
- Foumelis, M., Parcharidis I., Lagios, E., Voulgaris N., 2009, Evolution of post-seismic ground deformation of the Athens 1999 earthquake observed by SAR interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, doi: 10.1016/j.jappgeo.2009.02.007.
- Gardner, A. S., et al., 2013, A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise, 2003–2009. *Science*, No. 340, p. 852–857, doi:10.1126/science.1234532.
- Gaudio, C. D., 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, p. 48–56.
- Hobbs, W. R., Willis, J. K., 2013, Detection of an observed 135 year ocean temperature change from limited data. *Geophysical Research Letters*, 40, p. 2252–2258, doi:10.1002/grl.50370.
- Hsieh, Ch.-Sh., Tian-Yuan, Sh., Jyr-Ching, H., Hsin, T., Mong-Han, H., Jacques, A., 2011, Using differential SAR interferometry to map land subsidence: a case study in the Pingtung Plain of SW Taiwan. *Natural Hazards*. Volume 58, Issue 3, p. 1311–1332, doi 10.1007/s11069-011-9734-7.
- Johansson, M., Kahma, K., Boman, H., 2003, An improved estimate for the long-term mean sea level on the Finnish coast. *Geophysica*, 39, p. 51–73.
- Johansson, M., Kahma, K., Boman, H., Launiainen, J., 2004, Scenarios for sea level on the Finnish coast. *Boreal Environmental Research*, 9, p. 153–166.

- Johansson, M., Pellikka, H., Kahma K., Ruosteenoja, K., 2012, Global sea level rise scenarios adapted to the Finnish coast. *Journal of Marine Systems*, 129, p.35-46, doi:10.1016/j.jmarsys.2012.08.007.
- Kumar, V., G. Venkataraman; Y., Rao, S., 2009, SAR interferometry and Speckle tracking approach for glacier velocity estimation using ERS-1/2 and TerraSAR-X spotlight high resolution data. Conference Paper August 2009 DOI:10.1109/IGARSS.2009.5417663, Source: IEEE Xplore Conference: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009, Volume: 5.
- 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*, Vol. 31, L01608, doi:10.1029/2003GL019106.
- Kuo, C. Y., Shum, C., Braun, A., Cheng, K. C., Yi, Y., 2008, Vertical motion determined using satellite altimetry and tide gauges. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19, p.21-35.
- Levitus, S., Stephens, C., Antonov, J. I., Boyer, T. P., 2000, Yearly and year – Season upper ocean temperature anomaly fields, 1948-1998, NOAA Atlas NESDIS 40, Natl. Oceanic and Atmos. Admin., Silver Spring, Md. (Available at [http:// www.nodc.noaa.gov/OC5/PDF/ATLAS/nedis40.pdf](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/PDF/ATLAS/nedis40.pdf)).
- Meisina, C., Zucca, F., Conconi, F., Verri, F., Fossati, D., Ceriani, M., Allievi, J., 2007, Use of Permanent Scatterers technique for large-scale mass movement investigation. *Quaternary International*, 171–172, p. 90–107.
- Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., Jones, P.D., 2012, Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set, *Journal of Geophysical Research*, 117, D08101, doi:10.1029/2011JD017187.
- Nerem, R. S. and Mitchum, G. T., 2002, Estimates of vertical crustal motion derived from differences of TOPEX/POSEIDON and tide gauge sea level measurements. *Geophysical Research Letter*, Vol. 29, No. 19, doi:10.1029/2002GL015037.
- Nerem, R. S., and Mitchum G. T., 2001, Observations of sea level change from satellite altimetry, in *Sea Level Rise: History and Consequences*, edited by B. C. Douglas, M. S. Kearney, and S. P. Leatherman, pp. 121–163, Academic, San Diego, Calif.
- Plant, J. A., Whittaker, A., Demetriades, A., De Vivo, B., Lexa J., 2003, The Geological and Tectonic Framework of Europe. In: Salminen R (ed) *Geochemical Atlas of Europe. Part 1: background information, methodology and maps*. Geological Survey of Finland, Espoo, Finland.
- Pugh D. T., 1987, *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons.
- 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.
- Shepherd, A., et al., 2012, A reconciled estimate of ice-sheet mass balance, *Science*, 338(6111), 1183–1189, doi:10.1126/science.1228102.
- Tal E., 2016, *The Science of Sea Level Rise and the Impact of the Gulf Stream*. July 29, The Latest in Sea Level Rise Science
- Wadhams, P., Hughes N., and Rodrigues J., 2011, Arctic sea ice thickness characteristics in winter 2004 and 2007 from submarine sonar transects, *J. Geophys. Res.*, 116, C00E02, doi:10.1029/2011JC006982.
- Wahl, T., Haigh, I. D., Dangendorf, S., Jensen, J., 2013, Inter-annual and long-term mean sea level changes along the North Sea Coastline. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 1987–1992, ISSN 0749-0208.
- 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.
- Zhongwei, Y., Tsimplis, M. N., and Woolf, D., 2004, Analysis of the relationship between the North Atlantic oscillation and sea-level changes in northwest Europe. *Int. J. Climatol.* 24, pp. 743–758. doi: 10.1002/joc.1035.

К. Р. ТРЕТЯК, С. И. ДОСИН*

Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, *эл. почта: solomiya.dosyn@gmail.com

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ ЕВРОПЫ ПО ДАННЫМ МАРЕОГРАФИЧЕСКИХ И GNSS-НАБЛЮДЕНИЙ

Цель. Цель выполненного исследования – выявление и исследование различий в определении скоростей вертикальных движений земной коры (ВДЗК) Европы с помощью двух независимых методов – мареографических и GNSS-наблюдений. **Методика.** По результатам вычисления средних скоростей ВДЗК, используя мареографические ($V_{\text{map}} \pm m_{V_{\text{map}}}$) и GNSS-наблюдения ($V_{\text{GNSS}} \pm m_{V_{\text{GNSS}}}$), выполнено

интерполяции скоростей вертикальных движений ($V_{\text{мар}}^{\text{инт}}$ и $V_{\text{GNSS}}^{\text{инт}}$) в равномерно расположенных точках вдоль береговой линии Европы (через каждые 10 км) и определены их среднеквадратичные погрешности ($m_{V_{\text{мар}}^{\text{инт}}}$ и $m_{V_{\text{GNSS}}^{\text{инт}}}$). Исследования проводились отдельно по данным мареографических наблюдений и отдельно – по данным GNSS-наблюдений. **Результаты.** На основе обработки результатов мареографических и GNSS-наблюдений обнаружено разницу Δ (мм/год) между скоростями ВДЗК. При анализе этих различий установлено, что она характерна для всей территории Европы. Наибольшее значение она составляет $2,6 \pm 0,8$ мм/год на территории Фенноскандии, наименьшего – на территории Нидерландов ($0,6 \pm 0,2$ мм/год) и Балканского полуострова ($0,6 \pm 0,1$ мм/год). То есть Δ меняется в пределах от 0,6 до 2,6 мм/год. Средняя квадратическая погрешность m_{Δ} определения различий меняется в пределах от 0,1 до 0,9 мм/год. Среднее значение Δ для территории Европы составляет $1,8 \pm 0,5$ мм/год. Результаты определения распределения Δ сгруппировано в четыре условные блоки – территории, для которых наблюдаются почти одинаковые в пределах точности их определения значения средних разниц Δ . Первый блок (I) – это территория Фенноскандии и Центральной Европы ($\Delta \pm m_{\Delta} = 2,4 \pm 0,6$ мм/год), II – территория Западной Европы ($\Delta \pm m_{\Delta} = 0,7 \pm 0,2$ мм/год), третий (III) – территория Великобритании и Южной Европы ($\Delta \pm m_{\Delta} = 1,5 \pm 0,3$ мм/год), четвертый (IV) – территория Балканского полуострова ($\Delta \pm m_{\Delta} = 1,0 \pm 0,3$ мм/год). Эта составляющая имеет систематический характер, является постоянной в пределах определенных регионов и всегда положительной. Основным фактором, который вызывает появление Δ , является, очевидно, рост абсолютного глобального уровня моря, которое проявляется в мареографических наблюдениях, а также влияние солености и ветров. **Научная новизна.** В результате выполненных исследований появляется возможность совместного уравнивания мареографических и GNSS-наблюдений для определения скоростей ВДЗК вдоль береговой линии с учетом соответствующей систематической поправки Δ . А также возможность прогнозирования скорости ВДЗК. **Практическая значимость.** В результате выполненных исследований установлено систематическую разницу Δ между результатами определения скоростей ВДЗК с помощью мареографических и GNSS-наблюдений. Учет этой разницы дает возможность прогнозирования изменения положения береговой линии и изменения уровня моря, имеющих важное социэкономические последствия для населения, проживающего вблизи морских побережий. Изменение положения береговой линии также существенно влияет при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений и портов на прибрежных территориях.

Ключевые слова: вертикальное движение земной коры, GNSS-станция, мареограф, разница скоростей вертикальных движений.

K. R. TRET'YAK, S. I. DOSYN*

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

ANALYSIS OF THE RESULTS OF VERTICAL CRUST MOVEMENT VELOCITIES OF THE EUROPEAN COASTLINE PER THE TIDE GAUGE AND GNSS-OBSERVATION DATA

Purpose. The purpose of the study is to detect and investigate the differences in determining vertical crust movement velocities (VCMV) in Europe applying two independent methods: tide gauge and GNSS-observations. **Methodology.** As the result of the average crust movement velocity calculation applying tide gauge ($V_{\text{TG}} \pm m_{V_{\text{TG}}}$) and GNSS-observations ($V_{\text{GNSS}} \pm m_{V_{\text{GNSS}}}$) the interpolation of vertical crust movement velocities has been conducted ($V_{\text{TG}}^{\text{инт}}$ and $V_{\text{GNSS}}^{\text{инт}}$), at points equally set-along the European coastline (every 10 km), their mean-square error ($m_{V_{\text{TG}}^{\text{инт}}}$ and $m_{V_{\text{GNSS}}^{\text{инт}}}$) 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. **Results.** Based on processing the results of tide gauge and GNSS-observations the difference Δ (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 greatest t value of it is 2.6 ± 0.8 mm/year on the territory of Fennoscandia, the least one is on the territory of the Netherlands (0.6 ± 0.2 mm/year) and the Balkans (0.6 ± 0.1 mm/year). To say, Δ varies from 0.6 to 2.6 mm/year. The mean square error of m_{Δ} differences varies from 0.1 to 0.9 mm/year. The average Δ value on the European territory is 1.8 ± 0.5 mm/year. The results of determination of Δ are summarized in 4 set units: the territories which are almost identical in accuracy of determining the value of average Δ differences. The first unit (I) comprises the territory of Fennoscandia and Central Europe ($\Delta \pm m_{\Delta} = 2.4 \pm 0.6$ mm/year), the second one (II) comprises the territory of Western Europe

($\Delta \pm m_{\Delta} = 0.7 \pm 0.2$ mm/year), the third unit (III) comprises the territory of the United Kingdom and Southern Europe ($\Delta \pm m_{\Delta} = 1.5 \pm 0.3$ mm/year), the fourth one (IV) comprises the territory of Appenines Peninsula ($\Delta \pm m_{\Delta} = 1.0 \pm 0.3$ mm/year). This component has systematic and constant features in certain areas and is always positive. The main factor causing the appearance of Δ is obviously the increase of absolute global sea level, which is manifested in tide gauge observations as well as salinity and wind impact. **Scientific novelty.** The results of the study give the possibility of common balancing of tide gauge and GNSS-observations in order to determine vertical-crust movement velocities along the coastline taking into account relevant systematic error Δ and the possibility to predict vertical crust movement velocity. **Practical significance.** As the result of the study the systematic difference Δ between the results of the determination of vertical crust movement velocities applying tide gauge and GNSS-observations has been set. Taking into consideration this difference gives the possibility to predict changes of the coastline position and sea level changes. It also presents a significant socio-economic impact on people living not far from the seacoast. Changing the position of the coastline is also significant while designing and constructing hydrotechnical structures and ports at seacoasts.

Key words: vertical crust movement, GNSS-stations, tide gauge, difference of vertical crust movement velocities.

REFERENCES

- Lyskov, Y. A., Musykhyn, V. V., Kashnykov Yu. A. *Monytorynh deformatsyonykh protsessov zemnoi poverkhnosti metodamy radarnoi ynterferometry. Vistryk Permskoho natsynatsionalnoho yssledovatel'skoho polytekhnicheskoho unyversyteta. Heolohyia. Neftezhazovoe y hornoe delo.* 2010, no. 5, pp. 11–16.
- Tretyak, K. R., Dosyn, S. I. *Rekonstruktsiya vertikalnih ruhiv zemnoii kori za danimi mareografichnih sposterezhen* [Reconstruction of vertical movements of the earth's crust, according to tide gauge observations]. *Geodynamics*, 2014, 2(17), pp. 7–29.
- Ablain, M., Cazenave, A. et al. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project. *Ocean Science*, 2015, 11, 67–82, doi:10.5194/os-11-67-2015.
- Antonov, J. I., Levitus, S. and Boyer, T. P. Steric sea level variations during 1957-1994: Importance of salinity. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C12), 8013, doi:10.1029/2001JC000964.
- Barbot, S., Hamiel, Y., Fialko, Y. Space geodetic investigation of the coseismic and postseismic deformation due to the 2003 Mw7.2 Altai earthquake: Implications for the local lithospheric rheology. *Journal of Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, B03403, doi:10.1029/2007JB005063.
- Bindoff, N. L. et al. Observations: oceanic climate and sea level, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H.L., Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 2007.
- Bingley, R. M., Dodson, A. H., Penna, N. T., Teferle, F. N. and Baker, T. F. 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*. 2001, Vol. 3(PART 1), pp. 9–20.
- Bouin, M. N. and Wöppelmann, G. Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation. *Geophysical Journal International*, 2010, 180, pp. 193–209. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04411.x
- Brooks, B. A., Merrifield, M. A., Foster, J., Werner, C. L., Gomez, F., Bevis, M. and Gill, S. Space geodetic determination of spatial variability in relative sea level change, Los Angeles basin. *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, L01611, doi:10.1029/2006GL028171.
- Çakir, Z., Chabaliere, J.-B., Armijo, R., Meyer, B., Barka, A., Peltzer, G. Coseismic and early post-seismic slip associated with the 1999 Izmit earthquake (Turkey), from SAR interferometry and tectonic field observations. *Geophysical Journal International*. 2003, doi: 10.1046/j.1365-246X.2003.02001.x.
- Cazenave, A. and Nerem, R. S. Present-day sea level change: observations and causes. *Reviews of Geophysics*, 2004, 42, RG3001, doi:10.1029/2003RG000139.
- Cogley, J. C. Geodetic and direct mass balance measurements: *Comparison and joint analysis, Annals of Glaciology*, 2009, No. 50, p. 96–100, doi:10.3189/172756409787769744
- Colesanti, C., Wasowski, J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry. *Engineering Geology*, 2006, No. 88, p. 173–199.
- Farina, P., Moretti, S., Colombo, D., Fumagalli A., Manunta P. Landslide risk analysis by means of remote sensing techniques: results from the ESA/SLAM project. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'04. Proceedings IEEE International*, 2004.
- Foumelis, M., Parcharidis I., Lagios, E., Voulgaris N. Evolution of post-seismic ground deformation of the Athens 1999 earthquake observed by SAR interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, doi: 10.1016/j.jappgeo.2009.02.007.
- Gardner, A. S., et al. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise, 2003-2009. *Science*, 2013, No. 340, p. 852–857, doi:10.1126/science.1234532.

- Gaudio, C. D., 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*, 2010, 195, pp. 48–56.
- Hobbs, W. R., Willis, J. K. Detection of an observed 135 year ocean temperature change from limited data. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40, p. 2252–2258, doi:10.1002/grl.50370.
- Hsieh, Ch.-Sh., Tian-Yuan, Sh., Jyr-Ching, H., Hsin, T., Mong-Han, H., Jacques, A. Using differential SAR interferometry to map land subsidence: a case study in the Pingtung Plain of SW Taiwan. *Natural Hazards*, 2011, Volume 58, Issue 3, p. 1311–1332, doi 10.1007/s11069-011-9734-7.
- Johansson, M., Kahma, K., Boman, H. An improved estimate for the long-term mean sea level on the Finnish coast. *Geophysica*, 2003, 39, p. 51–73.
- Johansson, M., Kahma, K., Boman, H., Launiainen, J., Scenarios for sea level on the Finnish coast. *Boreal Environmental Research*, 2004, 9, p. 153–166.
- Johansson, M., Pellikka, H., Kahma K., Ruosteenoja, K. Global sea level rise scenarios adapted to the Finnish coast. *Journal of Marine Systems*, 2012, 129, p. 35–46, doi:10.1016/j.jmarsys.2012.08.007.
- Kumar, V., G. Venkataraman; Y., Rao, S. SAR interferometry and Speckle tracking approach for glacier velocity estimation using ERS-1/2 and TerraSAR-X spotlight high resolution data. Conference Paper August 2009 DOI:10.1109/IGARSS.2009.5417663, Source: IEEE Xplore Conference: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009, Vol. 5.
- 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*, 2004, Vol. 31, L01608, doi:10.1029/2003GL019106.
- Kuo, C. Y., Shum, C., Braun, A., Cheng, K. C., Yi, Y. Vertical motion determined using satellite altimetry and tide gauges. *Terrrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2008, 19, p. 21–35.
- Levitus, S., Stephens, C., Antonov, J. I, Boyer, T. P. Yearly and year – Season upper ocean temperature anomaly fields, 1948-1998, NOAA Atlas NESDIS 40, Natl. Oceanic and Atmos. Admin., Silver Spring, Md. 2000, (Available at <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/PDF/ATLAS/nedis40.pdf>).
- Meisina, C., Zucca, F., Conconi, F., Verri, F., Fossati, D., Ceriani, M., Allievi, J. Use of Permanent Scatterers technique for large-scale mass movement investigation. *Quaternary International*, 2007, 171-172, pp.90–107.
- Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., Jones, P. D. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set, *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117, D08101, doi:10.1029/2011JD017187.
- Nerem, R. S. and Mitchum, G. T. Estimates of vertical crustal motion derived from differences of TOPEX/POSEIDON and tide gauge sea level measurements. *Geophysical Research Letter*, 2002, Vol. 29, No. 19, doi:10.1029/2002GL015037.
- Nerem, R. S., and Mitchum G. T. Observations of sea level change from satellite altimetry, in *Sea Level Rise: History and Consequences*, edited by B. C. Douglas, M. S. Kearney, and S. P. Leatherman, 2001, pp. 121–163, Academic, San Diego, Calif.
- Plant, J. A., Whittaker, A., Demetriades, A., De Vivo, B., Lexa J. The Geological and Tectonic Framework of Europe. In: Salminen R (ed) *Geochemical Atlas of Europe. Part 1: background information, methodology and maps*. Geological Survey of Finland, Espoo, Finland, 2003.
- Pugh D. T. *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons, 1987.
- Santamaría-Gómez, A., Gravelle, M., Wöppelmann, G. Long-term vertical land motion from double-differenced tide gauge and satellite altimetry data. *Journal of Geodesy*, 2014, Volume 88, Issue 3, 207–222, doi: 10.1007/s00190-013-0677-5.
- Shepherd, A., et al. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance, *Science*, 2012, 338(6111), 1183–1189, doi:10.1126/science.1228102.
- Tal E. *The Science of Sea Level Rise and the Impact of the Gulf Stream*. July 29, The Latest in Sea Level Rise Science, 2016,
- Wadhams, P., Hughes N., and Rodrigues J. Arctic sea ice thickness characteristics in winter 2004 and 2007 from submarine sonar transects, *J. Geophys. Res.*, 2011, 116, C00E02, doi:10.1029/2011JC006982.
- Wahl, T., Haigh, I. D., Dangendorf, S., Jensen, J. Inter-annual and long-term mean sea level changes along the North Sea Coastline. *Journal of Coastal Research*, 2013, Special Issue No. 65, pp. 1987–1992, ISSN 0749-0208.
- Zervas, C., Gill, S., Sweet, W. Estimating Vertical Land Motion from Long-Term Tide Gauge Records. Technical Report National Ocean Service (NOS) CO-OPS 065, 2013, 22 p.
- Zhongwei, Y., Tsimplis, M. N., and Woolf, D. Analysis of the relationship between the North Atlantic oscillation and sea-level changes in northwest Europe. *Int. J. Climatol.* 2004, 24, pp. 743–758. doi: 10.1002/joc.1035.

Надійшла 15.10.2016 р.