

# Радіофізичний метод – know how у вимірюванні гравітаційного поля

## Інтродукція

ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»: поколінню «золотих корифеїв науки» присвячено -  
К. Пірагасу, О. Свірідову, Л. Благовіщенській, С. Жовміру, В. Копилову

*Всесвіт безкрайній та неймовірно прекрасний. Дивовижно простий в одних своїх  
проявах і надзвичайно складний в інших*

*Кіп Торн (Kip Thorne), американський фізик-теоретик, один із головних світових  
експертів загальної теорії відносності Ейнштейна, лауреат Нобелівської премії з фізики  
2017р.*

З давніх – давен людство цікавила сила тяжіння або гравітація. Перші відомі досліді з вивчення його природи пов'язані з іменем Галілео Галілея. Саме він проводив досліді з падінням тіл, використовуючи зокрема Пізанську вежу, та скочування з похилої площини. Однак, Закон всесвітнього тяжіння, у знайомій нам формі, **вперше** був сформульований лише у 1687 році англійський вченим Ісааком Ньютоном у роботі "Математичні принципи натуральної філософії". Відкриття Ньютоном Закону всесвітнього тяжіння стало інтелектуальним проривом для багатьох поколінь математиків, фізиків тощо.

## 1916 р. Берлін

Легендарний фізик, світоч науки 20-го століття - Альберт Ейнштейн публікує загальну теорію відносності (ЗТВ). Одним із висновків цієї теорії було те, що масивні тіла, наприклад, Земля, планети, чорні дірки та інші космічні об'єкти своїм гравітаційним полем можуть впливати на плин часу і на простір навколо себе. З другого боку, рух масивних тіл із змінним прискоренням може спричинити коливання простору-часу, тобто, виникнення гравітаційних хвиль.

Сила гравітації Землі є помірною, сповільнення часу в її полі складає лише кілька мікросекунд. Для порівняння, біля поверхні чорної дірки, де гравітація настільки величезна, що навіть світло не може її подолати, час майже не рухається.

## **1959 р. Кембридж**

Знадобилися роки технологічного прогресу для визрівання умов перевірки гіпотези А. Ейнштейна про сповільнення ходу часу в полі тяжіння. Тільки в 1959 році вчені з Гарвардського інституту Р. Паунд та його аспірант Г. Ребка змогли це достовірно підтвердити, використавши метод «Ефект Мессбауера». Учені порівняли швидкість плину часу в підвалі 22-метрової вежі Гарвардського університету зі швидкістю часу на верху цієї ж вежі. Експеримент був досить точним, визначивши різницю з похибкою до  $+0,0000000000016$  секунди (1,6 трильйонної частки секунди) у день. Отримана різниця перевищила поріг точності в 130 разів, тобто, час у підвалі сповільнювався на 210 трильйонних доль секунди в день у порівнянні з часом нагорі вежі. Таким способом вчені блискуче підтвердили одну із гіпотез ЗТВ А. Ейнштейна.

У 1976 році Р. Вессот зі Смітсонівської астрофізичної лабораторії Гарварду в рамках проекту «Gravity Probe A» підвищив точність перевірки, піднявши атомний годинник на 10 000 км за допомогою ракети NASA. Порівняння шкал рознесених годинників проводилося обміном радіосигналів дуплексним методом.

Р. Вессот виявив, що час на поверхні Землі сповільнюється приблизно на 30 мікросекунд ( $0,00003$  секунди) у день, порівняно з часом на висоті 10 000 кілометрів, підтвердивши, в межах точності експерименту, ейнштейнівський закон про сповільнення часу в гравітаційному полі.

## **1976 р. Київ**

Фахівці УкрЦСМ (нині ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ») долучилися до питання вивчення існування гравітаційних хвиль, саме про це йдеться у матеріалі наукової групи, що знаходиться в архіві підприємства. На підтвердження вищезазначеного - «Справа № 61», «Опис № 2 на 92 аркушах» свідчить, що у далекий 1976 рік група спеціалістів, зокрема, фахівці під керівництвом доктора ф.-м. наук К. А. Пірагаса та відповідального виконавця А.М. Свірідова займалися розробкою та відпрацюванням методу для

здійснення вимірів високочастотної складової гравітаційного поля. Для цього в якості реєстратора (приймача) гравітаційного поля використали квадрупольний масдетектор - резонансну антену Дж. Вебера.

У 1969 році в США Дж. Вебер вперше поставив експеримент з гравітаційними детекторами - двома алюмінієвими циліндрами довжиною по 1,5 м, діаметром 60 см, вагою 1,5 тони, що знаходилися на відстані один від одного на 1000 км. Циліндри підвішувалися на тонких нитках у вакуумній камері і їх коливання, викликані гравітаційною хвилею, перетворювалися надчутливими датчиками в електричні сигнали.

Неподалік УКРЦСМ була побудована експериментальна установка – гравітаційний детектор веберовського типу. У заключному звіті наукової групи зазначалося, що пристрій працював при кімнатній температурі протягом 18,5 діб. У ході цього експерименту фахівцями був зафіксований одиничний сплеск, який, оцінюючи характер зміни його амплітуди, не міг мати теплового походження, оскільки збільшення енергії за рахунок передачі тепла обмежене інерційними властивостями детектора. Різке наростання переднього фронту згаданого сплеску вказує на те, що він є результатом дії на детектор стороннього потужного імпульсу сили. Утім, походження цього імпульсу достовірно не встановлено з огляду на те, що були відсутні інші такі детектори, які б працювали за схемою збігу. Проте даний експеримент наших фахівців допоміг розробити методику реєстрації високочастотних варіацій гравітаційного поля, виготовити лабораторні зразки гравітаційного детектора та отримати експериментальні дані у вигляді записів амплітуди коливань гравітаційної антени та їх статистичної обробки.

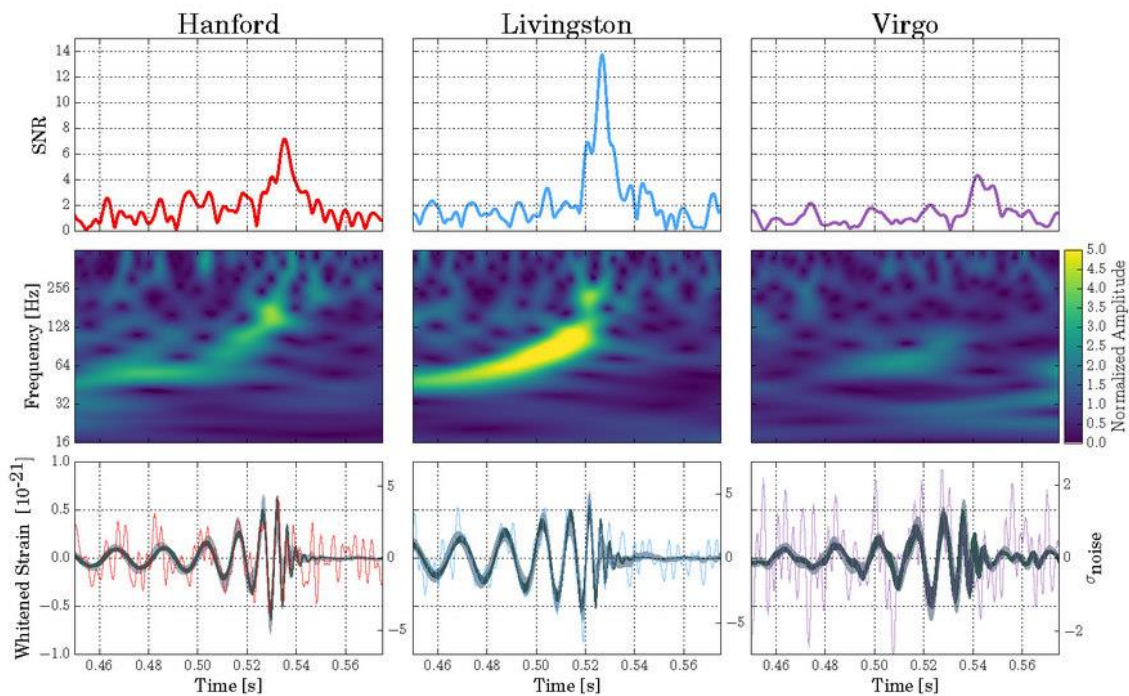
Загалом кажучи, експерименти Дж. Вебера і його послідовників не дали відповіді щодо природи отриманих сигналів. Окрім того, наукове товариство відкинуло твердження вченого про доцільність детектування гравітаційних хвиль за допомогою його антен. Водночас Дж. Вебер визнається родоначальником наукового напрямку гравітаційно-хвильової астрономії, що

включає нині такі проекти, як LIGO (лазерна інтерферометрична гравітаційно-хвильова обсерваторія).

## 2017 р. Стокгольм

Шведська королівська академія наук у Стокгольмі вручила Нобелівську премію з фізики: К. Торну, Р. Вайсу, Б. Баришу - основоположникам міжнародної колаборації LIGO.

Саме за результатами, отриманими на пристрої LIGO у 2016 році, колаборація LIGO та VIRGO оголосила про виявлення гравітаційних хвиль. Історичне детектування гравітаційних хвиль відбулося 11 лютого 2016 року у сигналі, зареєстрованому о 09:51 UTC 14 вересня 2015 року. Завдяки співпадінню в часі, вченим вдалося ототожнити напрям на ймовірне джерело сигналу. Астрофізики підтвердили факт злиття двох чорних дір масою  $\sim 30$  сонячних мас в тому напрямку і на відстані більше мільярда світлових років від Землі, яке відбулося 1,3 млрд років тому. Безсумнівно, відкриття такого рівня стане новим кроком у дослідженні Всесвіту.



Мал. <https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20170927a>

**P.S.** Витрати американського Національного наукового фонду на експериментальне підтвердження існування гравітаційних хвиль,

*передбачених 100 років тому А. Ейнштейном, склали понад 365 мільйонів доларів.*

Починаючи з 2016 р. відкрита нова ера гравітаційно-хвильової астрофізики. 25 років понад 900 фізиків з різних країн світу, залучених до співпраці з інтерферометричною гравітаційно-хвильовою обсерваторією (LIGO), намагалися зафіксувати коливання простору-часу. Тим часом у 2012 р. українські винахідники С. Матвієнко та інші розробники отримали патент на винахід «Спосіб визначення геодезичних параметрів та пристрій для його здійснення» (Патент України №98358). **Без перебільшення винахід українських вчених – це новий підхід в дослідженні гравітаційного поля і фіксації гравітаційних хвиль у світі.**

*Ідея новації заснована на радіофізичному методі вимірювання параметрів гравітаційного поля Землі, що базується на вимірюванні гравітаційного («червоного») зсуву частоти електромагнітного випромінювання в силовому полі Землі з використанням існуючих глобальних навігаційних супутникових систем.*

**Українські винахідники вперше у світі торували інноваційний шлях вимірювання гравітації за ефектом дії в радіо діапазоні.**

## **2015 р. Київ**

Скласти комплект апаратури на базі ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» для втілення ідей, зазначених у Патенті України, та визначення його технічних і метрологічних можливостей – стало основним завданням для команди фахівців. Отже, на базі підприємства була створена наукова група у складі: д.т.н., професора, заслуженого діяча науки і техніки України **О. Величка, М. Головні, к.т.н. С. Шевкуна, М. Домбровського, Ю. Куліш, О. Нікітенка**, робота якої координується заступником генерального директора з метрології ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ», к.т.н., заслуженим метрологом України **Ю. Кузьменком**. Згодом комплекс апаратури отримав назву «Гравіка».



Рисунок 1

*«Новаторський підхід науковців полягав у формулюванні технічних вимог до вимірювального обладнання і застосування високо стабільної частоти водневих генераторів, що входять до складу вторинного еталону одиниць часу і частоти», - наголошує Ю. Кузьменко.*

Варто відзначити значний внесок директора науково-виробничого інституту вимірювань електромагнітних величин ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»

**О. Величка**, який виступив фаховим консультантом метрологічного забезпечення проведення експериментів. Він переконаний, що *«точність вимірювань неодноразово давала можливість робити фундаментальні відкриття або*

*підтверджувати гіпотези».*

Однак чи не одним із найважливіших чинників у реалізації експерименту – сміливе рішення **М. Головні**, заступника начальника відділу державних еталонів електромагнітних величин, часу і частоти - реалізація схеми вимірювання прототипу «Гравіка» у ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ». Адже на думку *М. Головні: «Експеримент захопив неординарним підходом у вирішенні надскладного питання вимірювання результату дії гравітаційного поля, а саме: перехід із діапазону надвисоких частот (Р. Паунд і Г. Ребке) у радіо діапазон».* За його ініціативи почалася наукова співпраця з КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля», а пізніше з НВК «КУРС».

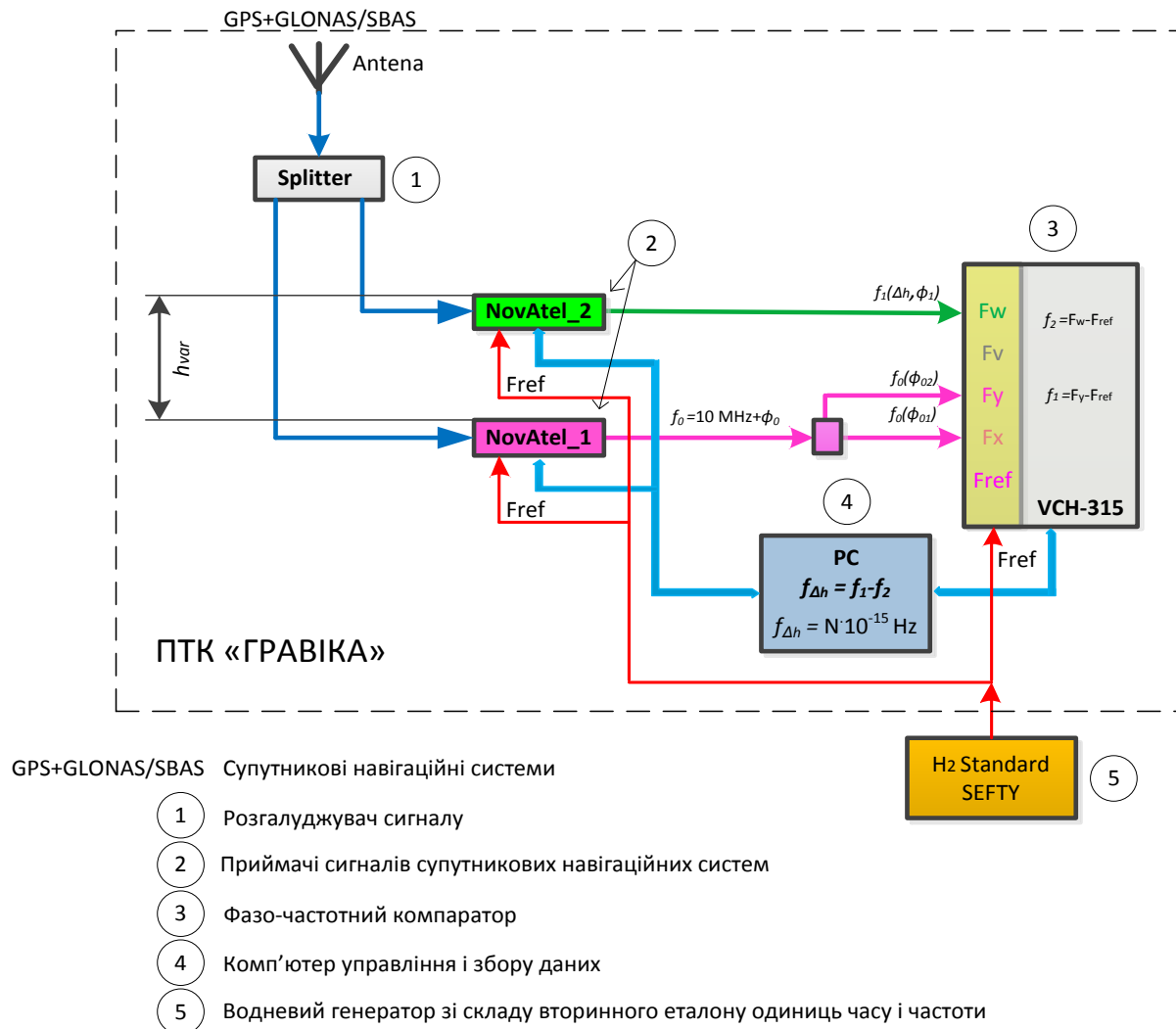
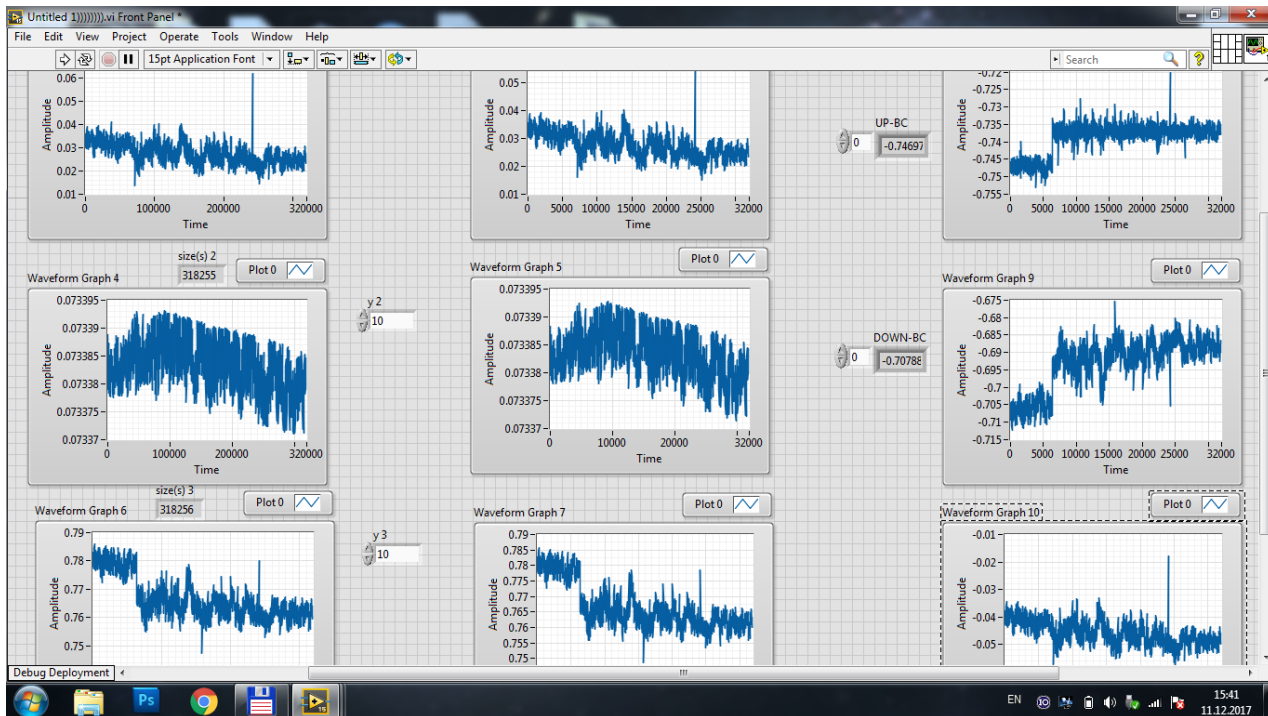


Рисунок 2. Базова схема вимірювального комплексу «Гравіка»

Водночас **С. Шевкун**, начальник відділу державних еталонів електромагнітних величин, часу і частоти разом з когортою молодих вчених підприємства підтримав та взяв участь у проекті на етапі випробування. У результаті аналізу отриманих даних стала очевидною необхідність застосування елементів математичного програмування у середовищі LabVIEW задля ефективного проведення експерименту.

Талановиті молоді науковці - **Ю. Куліш**, **М. Домбровський** створили програмне забезпечення первинної обробки масиву даних для подальшої обробки результатів.



*Рисунок 3. Результат попередньої обробки сигналів комплексу ПТК «Гравіка» на створеному програмному комплексі. Нижній правий графік на рисунку 3 - різниця частот між рознесеними приймачами на відстань 820 мм, яка несе інформацію про параметри гравітаційного поля*

Безумовно, реалізація ідей вимірювання прототипом «Гравіка» на базі підприємства дала змогу втілити в життя новаторські думки колег - науковців для розв'язання ряду цікавих і важливих задач.

## **2016 р. Київ**

Під час виконання робіт група спеціалістів ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» зіштовхнулася з низкою труднощів: приймачі навігаційних сигналів для геодезичних вимірювань не мали достатньої чутливості в часо - частотній області, вимірювальна апаратура не могла реєструвати зміни на часових інтервалах вимірювання менше 1000 с.

Необхідністю стало застосування частотного компаратора замість частотоміра, що дозволило підвищити чутливість вимірювання відносної зміни частоти на три порядки: з  $10^{-11}$  до  $10^{-14}$ .

З червня по грудень 2016 року у відділі державних еталонів електромагнітних величин, часу і частоти, науково-виробничого інституту вимірювань



електромагнітних величин та оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки (інститут №3) ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» проводились вимірювання прототипом комплексу «Гравіка», а саме: варіацій різниці вихідних частот приймачів сигналів глобальних навігаційних супутникових систем NovAtel EPSBase-6 при відносній зміні відстані між ними по висоті. Ця різниця частот використовується в ПТК «Гравіка» для отримання інформації про величину локального прискорення сили тяжіння.

Базовою метою вимірювання наукової групи ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» є відпрацювання оптимальної схеми дослідження мінімальної чутливості комплексу та впливу зовнішніх чинників, впливу додаткової інертної маси в безпосередній близькості на частоту одного з приймачів та встановлення певної відповідності між вимірюваною різницею частот і локальним прискоренням сили тяжіння (ПСТ)  $g$ . В якості частотних компараторів використовувались як вимірювально-обчислювальні частотоміри CNT-90 в різних варіантах підключення, так і вбудовані частотні компаратори стандартів частоти водневих VCH-1005.

Окремим варіантом схеми вимірювань було використання в якості джерела сигналу стандарту частоти і часу рубідієвого. Схеми вимірювань були складені у відповідності та на основі Патенту України.



Рисунок 4. Сузір'я навігаційних супутників, сигнали яких формують сигнал для ПТК «Гравіки»

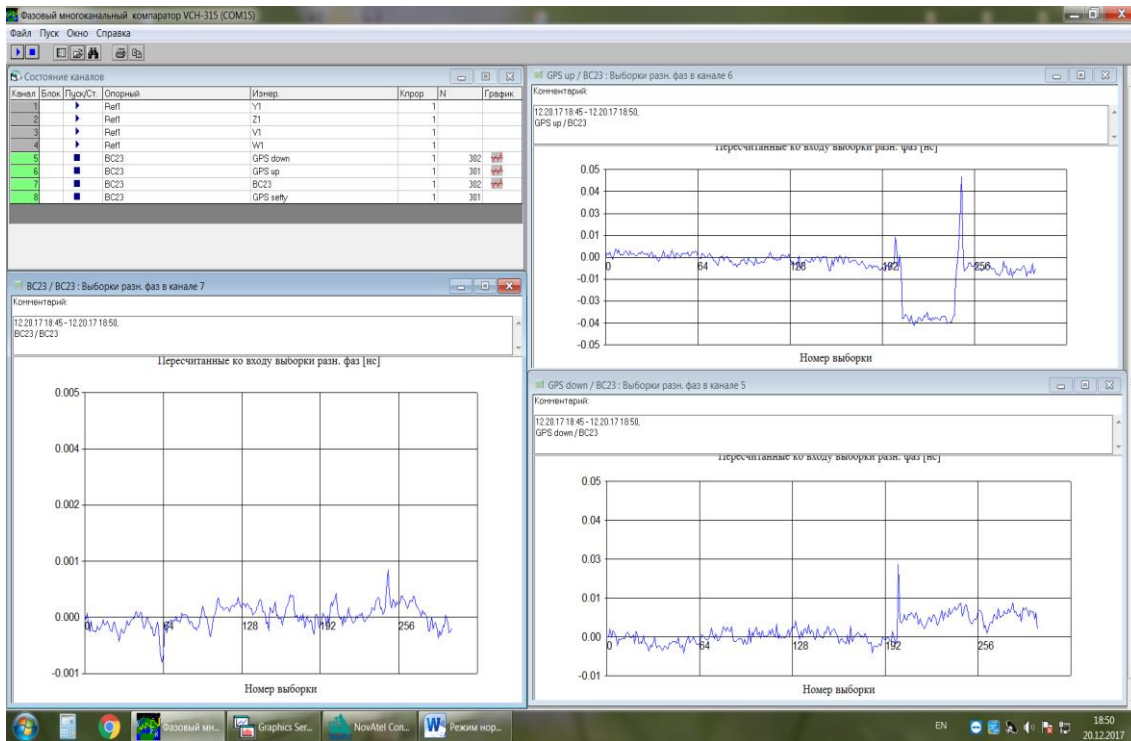


Рисунок 5. Зміна сигналу при контрольному переміщенні приймача на 820 мм по висоті - правий верхній графік

## 2017 р. Київ

Практичне використання ПТК «Гравіка» доволі широке. У майбутньому результати випробувань дозволять трансформувати набуті знання у створенні 3-D вимірної динамічної картини гравітаційного поля Землі. Не можна обійти увагою й можливість прогнозування і пошуку передвісників землетрусів разом з методами, які базуються на інших фізичних принципах, а також дозволить зменшити затрати у геологічних пошуках природних копалин.

ПТК «Гравіка» об'єднала біля себе науковців – однодумців. Їхня співпраця переконливо довела міркування *К. Ціолковського* «що тільки спільними зусиллями ми можемо досягнути практичного виконання нашого плану».

Фахівці впевнені, що міжнародна спільнота у найближчому майбутньому високо оцінить та використає результати експериментів для передбачення землетрусів і, зокрема, здешевлення пошуків (реєстрації) та досліджень гравітаційних хвиль. Українські вчені переконані, що даний метод дослідження

гравітаційного поля стане доповненням до експериментів LIGO, LISA в пошуках варіацій гравітаційного поля (гравітаційних хвиль).

***P.S. Автор висловлює щирі подяки за допомогу у підготовці статті своїм колегам, які не дивлячись ні на що, продовжують «горіти» наукою – Юрію Кузьменку, Олегу Величку, Мілентію Головні.***

Олена Трофімова,

прес – служба ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»