

## Автономні цифрові сейсмічні станції SV

Д. М. Гринь, С. Т. Вербицький, 2019

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна  
Надійшла 2 липня 2019 р.

Приведен исторический обзор развития автономных сейсмостанций, наиболее популярных в Европе и Северной Америке, которые использовались в масштабных международных проектах по изучению глубинного строения Земли в течение последних 50 лет. Описаны современные пассивные и активные сейсмостанции, применяемые в прикладной сейсмике. Сейсмическая разведка — один из наиболее информативных методов геофизики. Она предоставляет детальную информацию о глубинном и пространственном строении Земли, при использовании особенностей распространения сейсмических волн в геологических пластах с различными физическими свойствами. Волновое поле, возбужденное сейсмическим источником, распространяется в пространстве и времени, поэтому для его регистрации необходимо наличие одновременно большего количества точек наблюдения, что приводит к существенному увеличению количества оборудования и удорожанию сейсмической информации. Вместе с тем отсутствие цифровых сейсмических данных делает невозможным развитие фундаментальной сейсмике, сейсмического мониторинга и долговременного наблюдения за сейсмическими процессами в больших по площади рукотворных объектах.

Представлены автономные сейсмические станции, разработанные в Институте геофизики НАН Украины. Универсальность таких станций позволяет использовать их для широкого круга сейсмических и сейсмологических задач. Малая масса и размеры упрощают доставку и установку сейсмостанций на необорудованные пункты наблюдения, заболоченные и труднодоступные участки. Продолжительное время регистрации сейсмической информации и большой объем оперативной внутренней памяти способствуют использованию указанных станций для пассивных долгосрочных наблюдений. В сейсмостанциях реализовано несколько вариантов беспроводной связи для контроля за техническим состоянием станции, проверки качества сейсмической записи в реальном времени и дистанционного программирования с целью изменения режима ее работы.

**Ключевые слова:** автономная сейсмостанция, сейсмический мониторинг, сейсмограммы, геологическое строение, цифровая запись.

**Вступ.** Вивчення будови Землі з використанням сейсмічних методів дає змогу отримувати детальну та достовірну інформацію про геологічну будову та фізичні властивості порід на обраних територіях. Часова та просторова роздільна здатність і глибинність дослідження сейсмікою залежать від методики проведення польових робіт, енергії джерела (чи джерел) сейсмічних хвиль та кількості задіяного обладнання. Сейсміка є найінформативнішою порівняно з іншими методами геофізики, але ціна такого лідерства — висока грошова вартість отриманих знань про будову Землі, а одже сейсміку, дійсно можна вважати

найдорожчим методом геофізики, що обмежує її використання. Через брак коштів для науки у цілому та геофізики зокрема поступово занепадає зазначений напрям вивчення будови Землі, який створила упродовж десятиліть українська геологічна школа. Тому на сьогодні першочерговим завданням науковців є пошук шляхів здешевлення сейсмічних робіт з метою підвищення доступності сейсміки, її технологічності, а в кінцевому результаті конкурентоздатності.

Основні витрати у сейсміці пов'язані з логістикою, а саме з доставкою обладнання (доволі громіздкого, габаритного, важкого)

на задану територію, його встановленням та проведенням польових робіт, збором і обробкою сейсмічних даних. Вирішальними є час, складність топографії та геологічної будови ділянки, кількість людей і транспорту, задіяних у цих роботах.

Автори статті працюють над декількома напрямками здешевлення сейсмічних робіт, зокрема, розробляють адаптивну технологію проведення польових робіт та електричні джерела генерування сигналів складної форми і створюють автономні сейсмічні станції для збору даних. Адаптивна технологія передбачає використання індивідуального СВІП-сигналу (синусоїдальний сигнал із змінною у часі частотою), у якому враховано поглинальні особливості верхньої частини розрізу. СВІП-сигнал підбирають на кожному пункті збудження сейсмічних хвиль експериментальним шляхом. Ця методика дає змогу уникнути генерування непотрібних й надлишкових сейсмічних даних і отримати якісні дані на етапі польових робіт.

Інший напрям — створення універсальних автономних трикомпонентних сейсмостанцій для проведення максимально широкого спектра сейсмічних робіт: від завдань інженерної геофізики до вивчення глибинної будови Землі за методом глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ), сейсмічного моніторингу. Наявність цифрових сейсмічних станцій дає змогу частково від-

мовитись від використання сейсмічних кіс, особливо у важкодоступних (яри, болота, села, залізничні переїзди) місцях. Ці станції суттєво полегшують виконання робіт із сейсмічного моніторингу протяжних промислових об'єктів, які охоплюють велику площу та мають розгалужену мережу виробничих будівель.

**Історія створення автономних сейсмостанцій для вивчення будови літосфери Землі.** Створення сейсмостанцій для вивчення глибин Землі було знаковим етапом у розвитку сейсмічного обладнання. В їх конструкції зосереджені найпередовіші технічні й технологічні ідеї минулого. Поступове зменшення розмірів і маси сейсмостанцій та підвищення їх можливостей підштовхнуло вчених до активного використання цифрових технологій у прикладній і фундаментальній сейсміці.

Перший аналог «сейсмічної станції» (сейсмометра) — сейсмоскоп, створив у 132 р. н. е. Чжан Хенг (Zhang Heng), якого вважають Леонардом да Вінчі античного Китаю [Kuo-Hung Hsiao, Hong-Sen Yan, 2009].

Сейсмоскоп складався з драконів, які тримали шарики у роті, та жаб (рис. 1). Під час приходу сейсмічної хвилі шарик випадав з рота драконів і падав у рот жаб, які були розташовані під драконами. Азимут поширення сейсмічних хвиль від землетрусу визначали за жабою з шариком.

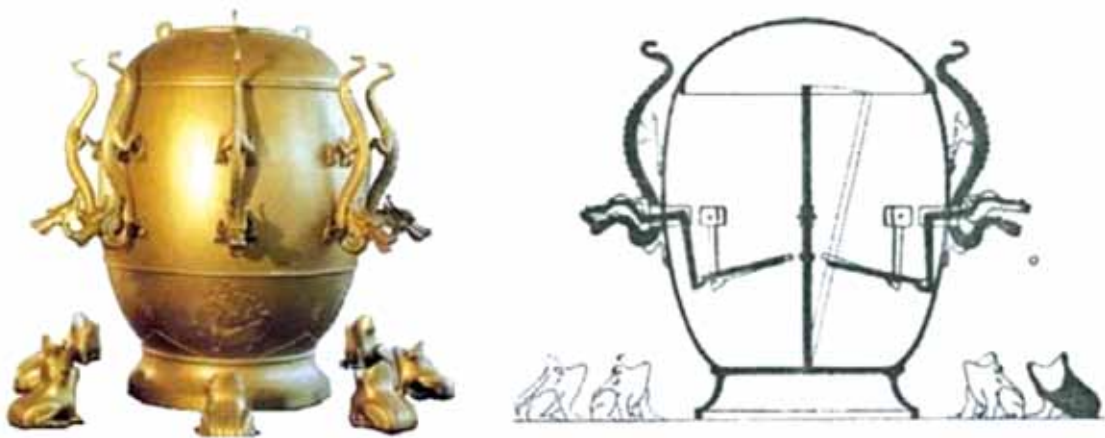


Рис. 1. Один з проектів реконструкції сейсмоскопа [Wang, 1963].

Пізніше, у 1848 р., італієць Качіаторе (Casciatiore) створив подібний сейсмоскоп, у якому замість шариків була ртуть. Під час горизонтального колювання ґрунту ртуть переливалась у суди, які були розташовані за азимутами сейсмоскопа. За його допомогою визначали напрямок приходу сейсмічних хвиль, інтенсивність події — за кількістю вилитої ртуті.

Під час Другої світової війни був розроблений безпроводний спосіб передачі сейсмічних даних по радіоканалу. Цей спосіб був запатентований у 1941 р. [Burg, 1941], а застосований для дистанційного запису сейсмічної інформації на початку 1970-х років. Система радіопередачі даних була розроблена для обладнання, яке використовували на перехідній зоні море—суша, заболоченій місцевості, неглибоких морських акваторіях [Tim Dean, et al., 2018]. Ідея полягала в тому, що антену розташовували на поплавку, а сейсмічний датчик був занурений у воду або лежав на дні. Сейсмічні дані записувались стаціонарними сейсмостанціями, встановленими на березі або на поверхні ґрунту. Безкабельні системи працювали в УКХ (VHF)-діапазоні (100—300 МГц), що давало змогу передавати аналогові сейсмічні дані практично у реальному часі на відстань декількох десятків кілометрів. Проте ці системи мали багато суттєвих недоліків, наприклад: необхідність ліцензії для роботи у цьому частотному діапазоні; висока енергозатратність передачі даних; обмежений термін працездатності акумуляторів; велика маса апаратури. Так, телеметрична система Opseis 5500 Telemetry System важила 17, Myriaseis — 10 кг (рис. 2). Часто інформація зникала через радіошуми (грози, трансформатори) та завади.

У 1979 р. компанія Globe Universal Sciences inc. розробила одноканальні автономні сейсмостанції Seismic Group Recorders (SGR). Це були перші станції, які оцифровували аналоговий сигнал і записували дані на магнітну стрічку (касети) в момент проведення польових робіт. Час запису подій був не більше 20 хв. Сейсмостанції активно використовували для по-



Рис. 2. Телеметрична система Myriaseis, яка працювала на частоті FM 76 МГц. Час роботи — 5 діб (фото 1982 р).

шуків нафти і газу у важкодоступних або заболочених регіонах, джунглях, тропічних лісах, горах. Доставляли ці станції на гвинтокрилах, формуючи з них сейсмічні профілі [Zhiguo Gao, 1998]. Завдяки відносно малим розмірам станцій їх використовували у логістично складних умовах Східної Африки [Prodehl, 2013]. Початок запису всіма станціями на профілі синхронізували за допомогою радіоканалу. По завершенні робіт записану сейсмічну інформацію копіювали на комп'ютер, який підключали до сейсмостанції. Відсутність передавальної частини зменшило її масу до 9 кг. У 1984 р. кількість таких станцій становила близько 4000 [Shave, 1982]. З появою сейсмостанцій SGR розпочалась ера цифрових технологій у сейсмозв'язці.

Наприкінці 1980-х років 200 сейсмічних станцій SGR, які належали Стенфордському університету (США), було модифіковано. В них вставили таймер з точним кварцовим годинником і температурною компенсацією, який, згідно з графіком проведення вибухів, вмикав на запис усі сейсмічні станції на профілі. Годинник сейсмостанцій синхронізували з основним годинником на робочій станції, де програмували всі SGR (рис. 3) [Prodehl, 1994,

2013; Exploring..., 2012]. Така модернізація обумовила створення сейсмічних профілів ГСЗ завдовжки понад 1000 км.



Рис. 3. Загальний вигляд сейсмостанції SGR з датчиком [Healy, 1982]. Фото зроблено під час польових робіт KRISP на початку 1990-х років у Східній Африці.

У 1985 р. було випробувано прототип сейсмічної станції PRS-1 (портативний рефракційний сейсмограф). Її створено у Лабораторії приладобудування Відділу геофізики Геологічної служби Канади (GSC) в Оттаві. В 1987 р. EDA Instruments Ltd випустили партію з 141 станції PRS-1. Пізніше одноканальну станцію PRS-1 було модернізовано до триканальної станції PRS-4 (3 канали — сейсмічні дані, 1 канал — час) з додатковою можливістю запису даних на зовнішні носії. Цю станцію використовували для сейсмологічних спостережень у усьому світі.

Канадська сейсмостанція мала вбудований високоточний кварцовий годинник і революційну на той час технологію запису сейсмічних даних в оперативну пам'ять. Розмір оперативної пам'яті був усього 1 Мб, але це дало змогу записати 500 000 дискретів оцифрованого аналогового сигналу, за часом — 40 хв. Маса сейсмічної станції дорівнювала 4,5 кг, а разом із супутнім обладнанням — близько 10 кг. Через

відносно малі розміри (130×230×280 мм) і масу жартома цю станцію називали «сейсмограф Lunchbox» («коробка для ланча») [A Portable..., 1992].

У 1990 р. компанія Texan (Refraction Technology, Dallas, Texas, США) почала серійне виробництво сейсмічних станцій RefTek 72A-02 (рис. 4, а). Спочатку це була 6-канальна станція, яку пізніше, переробили на 3-канальний портативний сейсмореєстратор. До складу станції входили REF TEK 72A такі блоки.

1. Система збору даних (DAS), обладнана 24-бітним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) і 2,5 Мб інтегрованої оперативної пам'яті. В цій моделі уперше АЦП був 24-бітним, що підвищило чутливість станції до слабких коливань ґрунту. Всі станції, які описано вище, мали 12-бітний АЦП.

2. Підсистема копіювання сейсмічної інформації, яка вбудована у пам'ять станції, на жорсткі диски. На початку ємність зовнішнього диска дорівнювала 200 Мб, з часом її збільшили до 4 Гб. Це давало змогу проводити польові дослідження безперервно протягом декількох місяців, фактично вирішуючи завдання сейсмічного моніторингу або сейсмологічних спостережень.

3. Супутникова система визначення точного часу GPS і вбудований годинник OMEGA. Перед початком запису сейсмічних хвильових полів годинник станції синхронізують за допомогою системи GPS.

Маса станції — 7 кг, розміри 32,5×21×19,7 см. Це було досить складне у використанні обладнання (багато супутніх блоків і важких батарей), але висока надійність сприяла популярності станцій. У 1998 р. кількість станцій, які були у розпорядженні Стенфордського університету, досягла 320.

Інша американська компанія Teledyne Brown Engineering, (Dallas, Texas, США) практично одночасно з компанією Texan випустила станцію Teledyne Geotech PDAS-100 (рис. 4, б). У станції були 24-бітний АЦП (власної розробки) і мікрокомп'ютер, що дало змогу записувати сейсмічні події на 4,5 Мб оперативної пам'яті. Параметри



Рис. 4. Сейсмостанції Ref-Tek Portable Seismic Recording System 72A-08/3 Seismograph з 72A-05 Recorder (а) і Teledyne Geotech PDAS-100 Seismic Portable Seismograph (б).

збору польових даних і записані в полі сейсмічні дані копіювали на комп'ютер за допомогою програмного забезпечення Teledyne-Geotech. Ціна перших регістраторів була більш як 100.000 \$ США [Мишаткин, 2008].

На початку 1990-х років Європейський Союз для власного пула (місця, де беруть в оренду геофізичне обладнання) на базі GeoForschungsZentrum (Potsdam, Німеччина) активно підшукував собі цифрові сейсмічні станції, тестуючи переважно канадські та американські зразки. У 1993 р. були закуплені PDAS-100 і RefTek 72, які стали основними приладами для ГСЗ-профілювання в Європі [Exploring ..., 2012].

Стрімкий розвиток мікроелектроніки наприкінці ХХ ст. не оминув і виробництво сейсмічних станцій. У 1999 р. американські інженери та конструктори, скориставшись мініатюризацією та здешевленням елементної бази, запустили у виробництво нове покоління сейсмічних станцій RefTek 125 (Texas). Ініціатор створення нового типу сейсмостанцій — Техаський університет в Ель-Пасо (США). Це найменша і найлегша на той час сейсмостанція, одноканальна, з 32 Мб внутрішньої пам'яті, що забезпечує 32 год безперервного запису сейсмічних даних, дискретність 10 мс. Маса станції — 1,4 кг. Джерело енергії — дві батарейки типу D-cell (LR20), на яких вона працює до 10 днів. Станція має високоточний кварцовий годинник з температурною компенсацією. Сейсмостанції

RefTek 125 приєднують (перед початком сейсмічних робіт) через додаткове периферійне обладнання до комп'ютера, вони отримують точний час із системи GPS, мають часовий графік включення і виключення для запису сейсмічних подій. Одночасно до периферійного обладнання для програмування або зчитування записаних даних можна підключати 45 станцій.

Периферійне обладнання до сейсмостанцій RefTek 125 складається з чотирьох блоків. Така багатомодульна конструкція периферійного програмувального обладнання, на перший погляд, видається вдалою, оскільки можлива оперативна заміна блоку, що не працює. Однак за відсутності запасних блоків вихід з ладу хоча б одного з елементів периферійної системи унеможливорює програмування всіх станцій. А це означає неможливість проведення запланованих польових робіт і втрату великих коштів на підготовчі роботи.

У середині 1999 р. Техаський університет в Ель-Пасо (США) мав у своєму розпорядженні 440 станцій RefTek-125. Упродовж того року було проведено п'ять великих дослідницьких проектів, у трьох з них використовували по 400 сейсмостанцій [Keller et al., 2005b]. У тому самому році найновіші американські станції, завдячуючи проф. Келлеру (G.R. Keller, Department of Earth Sciences, University of Texas at El Paso, El Paso, TX, USA), були доставлені в Україну для використання у міжнародному проекті «DOBRE-99». Усього на 360-кілометровому профілі було встановлено 245 сейсмостанцій, проведено 11 підземних вибухів [DOBREFraction'99, Grad, 2003].

Наявність багатьох революційних ідей, реалізованих у цих станціях, зробили їх надзвичайно популярними. У 2000 р. сумарна кількість сейсмічних станцій RefTek-125 (Texas) була хорошим мотивуючим аргументом для проведення грандіозного міжнародного проекту CELEBRATION 2000 з вивчення будови літосфери Центральної Європи. Цей проект об'єднав учених з 28 наукових організацій Європи та Північної Америки. У проекті було використано 1230 сейсмостанцій різних типів, з них — 840

станцій RefTek-125, які надали різні країни, зокрема Австрія — 15, Данія — 100, Фінляндія — 10, Польща — 15, Турція — 60, США — 640. Загальна довжина профілів ГСЗ — 8900 км, на них було розташовано 147 пунктів вибуху [Guterch et al., 2003].

На сьогодні відбулось декілька етапів модернізації цих сейсмостанцій та периферійних пристроїв до них. Новіші моделі отримали оперативну пам'ять до 1 Гб, можливість програмно змінювати коефіцієнт підсилення, а також компактніше периферійне обладнання тощо.

У 2006 р. Інститут геофізики НАН України придбав 30 сейсмостанцій RefTek-125А,

які використовують для проведення фундаментальних [Starostenko et al., 2013a, 2013b, 2015, 2016] і прикладних робіт на територіях України та Польщі (рис. 5).

Найновішою європейською сейсмостанцією автономного типу для ГСЗ-профілювання можна вважати реєстратор DSS CUBE, розроблений в GeoForschungs-Zentrum (Potsdam, Німеччина) влітку 2009 р. Уже у вересні 2009 р. було випущено першу пробну партію з 14 сейсмостанцій. Це перші станції, яким не потрібне спеціалізоване периферійне обладнання для їх підготовки до польових робіт, оскільки завдяки мініатюризації воно вже стало

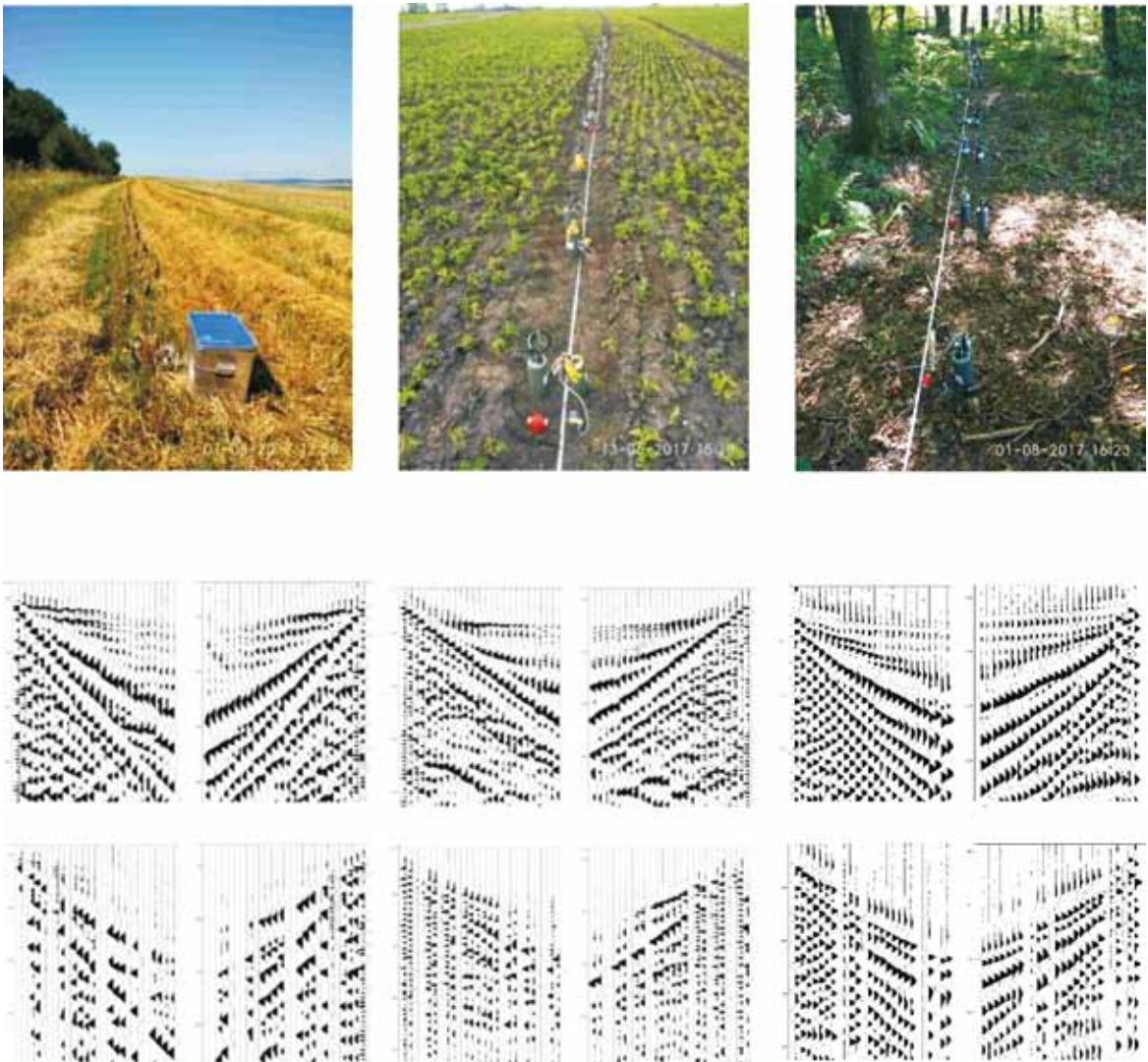


Рис. 5. Приклади використання сейсмостанцій RefTek-125А для інженерно-геофізичних досліджень та сейсмічні записи поздовжніх і поперечних хвиль за їх допомогою.

складовою частиною сейсмостанцій, наприклад система точного часу і визначення координат GPS. Низьке енергоспоживання забезпечує безперервний запис на двох батареях типу D-cell (LR20) упродовж 20 днів (9 днів із включеним GPS). Станція починає запис даних в оперативну пам'ять розміром у 2 Гб одразу після встановлення елементів живлення. Зчитування даних та її програмування відбуваються через USB-інтерфейс. Маса станції — 1 кг.

DATA-CUBE<sup>3</sup> — найсучасніший автономний 3-канальний сейсмічний пристрій запису даних (рис. 6). Він розроблений у GFZ у 2011 р., пізніше модернізований у тісній співпраці компанії Omnirecs/DiGOS та GFZ з метою задовільнити вимоги, які з'явилися протягом багатьох років роботи сейсмічних станцій у різних організаціях і під час вимірювань у суворих умовах. Усього було продано понад 1100 рекордерів DATA-CUBE<sup>3</sup> у більш ніж 20 країн. 50 сейсмостанцій DATA-CUBE, власниками яких є Інститут геофізики Польської академії наук, використовували у міжнародному проекті GEORIFT 2013 [Starostenko, 2018], і 150 сейсмостанцій DATA-CUBE (GFZ, Німеччина) — у 2018 р. у проекті TTZ-South.

Найновіша американська трикомпонентна сейсмостанція Magseis Fairfield ZLAND (Houston, Texas, USA) була вибрана основною (рис. 7) для пулу IRIS PASSCAL. У лютому 2019 р. доступна кількість цих станцій становила понад 1000.

**Сучасні сейсмічні станції для прикладних робіт.** Прикладні сейсмічні роботи з

досліджень геологічної будови середовища можна розділити на пошукові та вишукувальні. В окремий вид сейсмічних робіт можна виділити довготривалий у часі сейсмічний моніторинг великих за площею територій або об'єктів зі складною геометрією розстановки пунктів автономного спостереження. Для пошукової, на корисні копалини, та вишукувальної інженерно-геофізичної сейсміки наявність автономних сейсмостанцій — щонайшвидше питання комфорту у проведенні польових робіт, ніж виробнича необхідність. На сьогодні є практика комбінування провідних та безпроводних технологій у зборі сейсмічних даних. Автономні сейсмостанції залучають до польових робіт на важкодоступних ділянках зі складним рельєфом, автотрасами, залізницею, річками та на частково заболочених територіях. Такий підхід у проведенні робіт заощаджує чималі кошти та час, полегшує логістичні завдання, зменшує потребу у кількості обслуговуючого персоналу.

Вишукувальні інженерно-геофізичні роботи, як правило, проводять у досить складних умовах, оскільки території обстеження мають надзвичайно розгалужену інфраструктуру житлових та виробничих об'єктів з малою кількістю відкритого ґрунту, наявністю транспортних розв'язок і підземних комунікацій. Від якості отриманого сейсмічного матеріалу залежить достовірність розв'язку обернених задач, а в підсумку — правильність наданих замовнику фізичних параметрів ґрунтів або



Рис. 6. Сейсмічні станції RefTEK 125 «Техас» і DATA-CUBE з датчиком. Підготовка до польових робіт за міжнародним проектом GEORIFT 2013 в Інституті геофізики НАН України [https://www.igf.edu.pl/aktualia-en.php].



Рис. 7. Сейсмостанції Magseis Fairfield ZLAND 3C Node.

геологічної будови під майбутнім об'єктом будівництва. Тому використання автономних станцій може суттєво спростити планування архітектури полігона та вибір методики проведення вишукувальних робіт. Фактично вони допомагають провести якісніші сейсмічні роботи, незважаючи на несприятливі умови.

Сейсмічний моніторинг за методикою спостереження ближчий до робіт за методом ГСЗ, ніж до СГТ чи приповерхневої сейсміки, оскільки сейсмічні події одночасно реєструються багатьма станціями на великій території. Сейсмостанції для такого типу робіт мають простішу конструкцію, але для них потрібні додаткові елементи живлення, місце для накопичення інформації та можливість підключення зовнішньої антени GPS. Без наявності автономних сейсмостанцій проводити довготривалий сейсмічний моніторинг неможливо.

Довгий шлях експериментів та імпровізацій з реєструвальним сейсмічним обладнанням зумовив створення двох типів цифрових сейсмостанцій: пасивних і активних.

Пасивні сейсмостанції мають відносно просту конструкцію і складаються з датчика вертикальних коливань, плати АЦП, живлення (акумуляторів або батарейок), системи точного часу і координат GPS, оперативної пам'яті. Поява цього типу станцій стала можливою після вільного доступу до військової, в минулому, супутникової навігаційної системи визначення місцезнахо-

дження — Global Positioning System (GPS), з якої вона через визначений інтервал (15, 30, 60 хв ...) бере точний час UTM і координати свого розташування. Пізніше цей час використовують для внесення поправок у сейсмічний запис. Пасивними станції називають тому, що вони записують сейсмічні дані у внутрішню оперативну пам'ять. По завершенні польових робіт усі сейсмостанції доставляють на базу, де сейсмічні дані зчитують

через спеціалізовані станції збору цифрових даних та зарядки акумуляторів.

За останні декілька років випущено 4 типи пасивних станцій для запису сейсмічних даних (рис. 8). Зокрема, Geospace Technologies ([www.geospace.com](http://www.geospace.com), США) — Geospace GCL, Dynamic Technologies (<https://smartsolo.com>, Канада) — SmartSolo DTCC, Geophysical Technology Inc. (<https://geophysicaltechnology.com>, США) — NuSeis NRU 1C, Innoseis ([www.innoseis.com](http://www.innoseis.com), Нідерланди) — TremorNet.

Деякі найновіші пасивні сейсмостанції мають безпроводні технології передачі невеликої кількості інформації на короткі відстані (до 10 м) для контролю за самодіагностикою та технічним станом. Їх об'єднують системами Bluetooth або WiFi.

Активні сейсмостанції конструктивно складніші — вони додатково (до пасивних станцій) мають засоби безпроводної передачі даних (радіоканали, WiFi, стільникову мережу LTE/4G) та мікрокомп'ютер, який формує пакети даних і відправляє їх у реальному часі на ретранслятор або базову станцію збору сейсмічної інформації. Як правило, активні станції споживають більше електроенергії, ніж пасивні, через необхідність передавати та отримувати дані; час їхньої автономної роботи у 3—4 рази менший, тому до них приєднують зовні акумулятори великої ємності, за рахунок чого вони стають важчими.

Компанія Wireless Seismic (<https://wire->





Рис. 8. Пасивні сейсмостанції Geospace GCL, SmartSolo DTCC, NuSeis NRU 1C, TremorNet.

lesseismic.com) у 2009 р. [Kendall, 2015] запустила у серійне виробництво станції Wireless Seismic Mk2 з радіоканалами, у 2012 р. — модернізовані станції RT System 2, а у 2017 р. — RT System 3 (рис. 9, а). Інший виробник Sercel (Франція) у своїх сейсмостанціях WTU-508 використав для передачі даних і контролю якості в реальному часі технологію безпроводної комп'ютерної мережі Wi-Fi на частотах 2402—2480 МГц (рис. 9, б) (<http://www.sercel.com>).

Систему Sigma компанії iSeis (США) (рис. 9, в) випущено у 2010 р., вона відрізняється від описаних вище моделей тим, що її можна застосовувати у різноманітних конфігураціях, оскільки має ознаки універсальної сейсмічної станції. Її можна використовувати в режимі пасивної або активної сейсмостанції, з передачею сейсмічних даних у режимі реального часу по безпроводному каналу WiFi, є радіоке-

рування, кабельне підключення 100base-T Ethernet до комп'ютерної мережі, стільниковий зв'язок (модем). В останній моделі 2017 р. — Sigma4 додано внутрішній трикомпонентний 2-герцевий геофон для пасивних сейсмічних спостережень.

**Автономні сейсмічні станції SV.** На сьогодні понад десятка європейських і північноамериканських компаній пропонують готові рішення для телеметричних систем на базі різних за складністю сейсмостанцій. В умовах скорочення попиту на нове сейсмічне обладнання, яке спостерігається останніми роками, і зростання конкурентної боротьби за покупця, компанії, які розробляють сейсмічну апаратуру, розділилися на дві групи. Одні пішли шляхом виробництва максимально дешевого обладнання з мінімальними можливостями, інші випускають універсальне сейсмічне обладнання з максимальними технічними можливос-

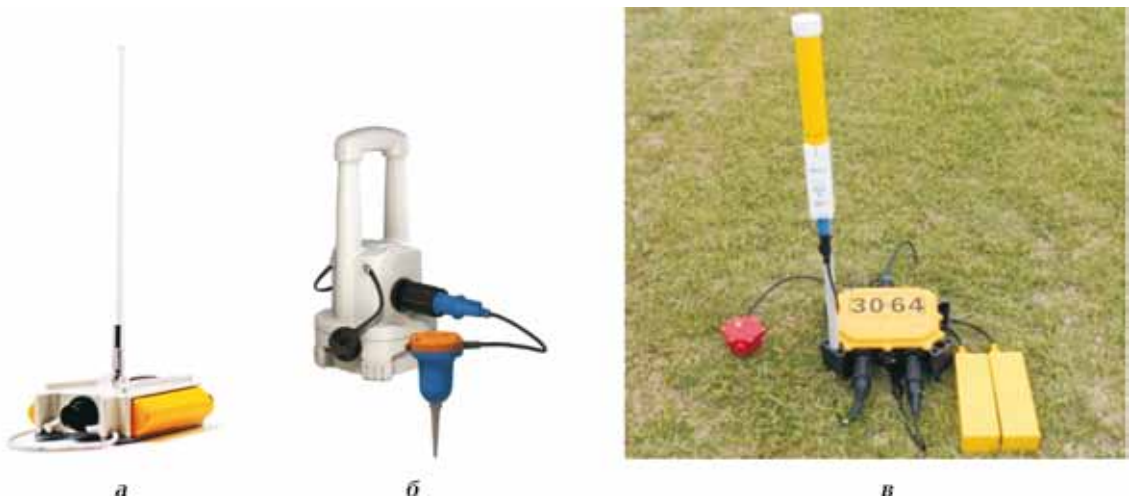


Рис. 9. Активні сейсмостанції: а — RT System 2, б — WTU-508, в — Sigma.

тями, надаючи тим самим можливість вибору методик проведення польових робіт.

Закони вільного ринку примушують виробників постійно модифікувати і вносити конструктивні зміни в апаратуру, створюючи нові зразки і полишаючи старі із втраченою сервісних зобов'язань. Термін післягарантійного сервісу скоротився до 3—4 років. Унаслідок цього багато сейсмічного обладнання можна відремонтувати лише з використанням донорів, тобто аналогічної непрацюючої апаратури. Це створює серйозні труднощі для власників застарілого, але в цілому працездатного обладнання.

Всебічно проаналізувавши доступну інформацію про технічний рівень сучасних сейсмостанцій, Інститут геофізики НАН України прийняв рішення про створення українських станцій. Розробку й виготовлення експериментальних зразків різної конфігурації (як один із напрямів роботи) було проведено у рамках реалізації конкурсних інноваційних проектів НАН України у 2017—2019 рр. (рис. 10).

Вимоги до технічних характеристик сейсмостанцій були продиктовані завданнями, які вирішує Інститут геофізики НАН України, а саме вивчення глибинної

будови Землі (профілі СГТ, ГСЗ), довготривала реєстрація місцевих або віддалених землетрусів з використанням тимчасових пунктів спостереження (фундаментальні задачі) та сейсмічні роботи для інженерної геофізики, екології, археології, сейсмічний моніторинг великих і протяжних об'єктів, таких як дамби, хвостосховища, нафто-, газопроводи (прикладні завдання).

**Загальні технічні вимоги до сейсмостанцій серії SV.** Умови експлуатації є важливим чинником, який необхідно врахувати під час проектування сейсмічного обладнання. Станції повинні мати високий рівень захищеності від вологи, тобто корозійностійкий корпус, оскільки працюють під час дощу, снігу або закопані у землю, та герметичні контакти, що забезпечують зв'язок із зовнішніми пристроями — антеною GPS, датчиками, додатковими елементами живлення.

Великі перепади температури під час експлуатації станцій зобов'язують використовувати дорожчу і надійнішу елементну базу та стійкіші до перепадів температури елементи живлення. Температура нагрітого літнім сонцем корпусу становить понад +60 °С, а взимку опускається



Рис. 10. Експериментальні зразки сейсмічних станцій SV-1.1, SV-2.1, SV-2.2 і SV-3.1.

до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За таких критичних перепадів температури необхідно забезпечити стійку роботу кварцу, який відповідає за частоту дискретизації аналогового сигналу, і використовувати активну систему корекції часу, яка б враховувала зміни температури за відсутності доступу до супутникової системи точного часу GPS.

Автономність та самодостатність — основні вимоги, які мають бути реалізовані у сейсмостанціях без жодних додаткових пристроїв для їх роботи. Потрібно врахувати, що сейсмічні дослідження виконують, як правило, у польових умовах, далеко від бази, де немає умов для ремонту і часто відсутня електроенергія та запасні складники. Поломка будь-якого допоміжного обладнання може призвести до зупинки недешевих сейсмічних робіт і поставити під загрозу проведення комплексу польових робіт. Отже, чим простіша система збору сейсмічних даних, тим вона надійніша.

Маса та розмір — надзвичайно важливі параметри геофізичного обладнання. Вартість логістики на сьогодні дуже висока. Великі маса й кількість обладнання, яке необхідно доставити до місця призначення, суттєво здорожчують проведення будь-яких робіт, оскільки потрібні велика кількість людей і транспорту. Інколи маса обладнання і його кількість є критичними, наприклад, у разі проведення дослідницьких робіт у віддалених важкодоступних місцях або горах.

Час безперервної роботи залежить від обсягу оперативної пам'яті, куди записують сейсмічні дані, та ємності елементів живлення. Економію енергії і продовження часу роботи може забезпечити перехід за програмно запланованого графіком режиму «сну», коли станція припиняє записувати коливання ґрунту. За довготривалих спостережень має бути передбачена можливість зовнішнього підключення додаткових акумуляторів.

Наявність у сейсмостанцій модулів безпроводного зв'язку (Bluetooth, WiFi, радіоканал, модем LTE/4G) дає змогу забезпечити контроль за роботою станції або сейсмічних датчиків.

**Схема сейсмостанцій серії SV.** Схему сейсмічної станції умовно можна поділити на три частини (рис. 11). Перша, найголовніша, — це процесор та аналого-цифровий перетворювач. Процесор відповідає за роботу всієї станції, він керує логікою та периферійними пристроями завдяки програмному забезпеченню, яке встановлюють на сейсмічну станцію за допомогою програматора. Програмне забезпечення можна змінювати, згідно з модернізацією конфігурації сейсмостанції, додаючи нові команди, розширюючи її технічні можливості. До цієї частини підключено оперативну пам'ять, систему визначення координат і точного часу GPS, радіоканал, порт зовнішнього обміну даними USB, безпроводний порт обміну даними WiFi, систему контролю за живленням, теромодатчики.

Друга частина — фільтри. Аналоговий сигнал, який формується сейсмічними датчиками, потрапляє у фільтри, де він позбавляється тих гармонік, що призводять до некоректної роботи аналого-цифрового перетворювача. Оцифровані дані автоматично записуються в оперативній пам'яті сейсмостанції або можуть бути передані по бездротовому зв'язку в центр обробки даних.

Третя частина — живлення. Від типу носія енергії залежить час виконання сейсмічних робіт. Для тривалих польових спостережень необхідно мати акумулятори підвищеної ємності.

**Аналого-цифровий перетворювач (АЦП).** У сейсмостанції встановлений 24-бітний 4-канальний АЦП, який перетворює відфільтрований аналоговий сигнал із сейсмодатчиків на масив дискретних значень з частотою 4000 Гц, тобто за одну секунду він робить 4000 виборок з кожного аналогового сигналу. Така частота дискретизації необхідна для проведення малоглибинних сейсмічних робіт з високою роздільною здатністю або досліджень високочастотних сейсмічних коливань у шахтах, що утворюються під час виникнення мікротріщин. У реальному часі АЦП оцифровує чотири канали. Три канали — дані датчиків X-, Y- та Z-поляризації сейсмічної хвилі. Четвертий канал — ре-

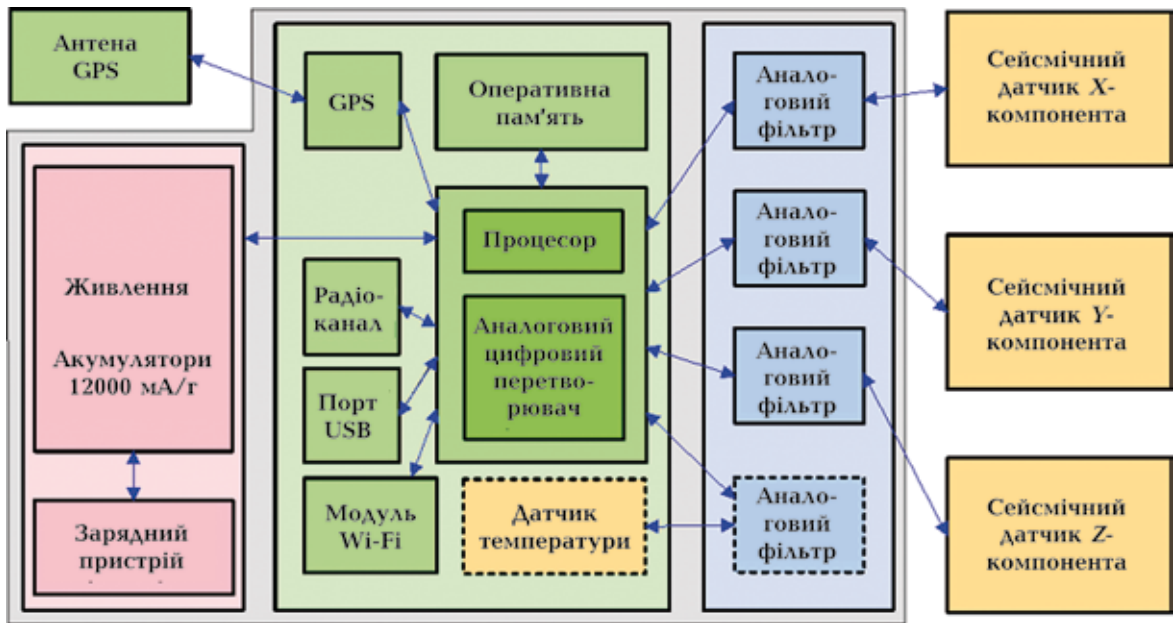


Рис. 11. Схематичне зображення структури сейсмічної станції SV.

зервний, у майбутньому він буде оцифровувати, наприклад, покази внутрішнього термометра, які використовуватимуть для розрахунків з корекції роботи кварцу за втрати даних GPS. Час корекції буде індивідуальним для кожної станції, оскільки її можуть розташувати у місці з індивідуальним температурним режимом.

**Фільтр аналогового сигналу.** Задача аналогового фільтра полягає у попередній підготовці аналогового сигналу до його дискретизації. Наявність шкідливих гармонік для АЦП призводить до появи артефактів у цифрових записах, шумів і спотворення істинних сейсмічних даних. У такому разі використовують високо-частотний фільтр четвертого порядку. Такий тип фільтра є обов'язковим перед каскадом АЦП. Він фільтрує різного роду наведення та радіочастоти, які впливають на котушки індуктивності сейсмічних датчиків. У сейсмістанції є три незалежні фільтри для трьох сейсмічних каналів. Перед фільтром вставлені запобіжники від статичних і блукаючих токів, які можуть бути в околі ЛЕП, нафто- і газопроводів, або від блискавок.

**Блок живлення сейсмістанції.** Блок живлення є важливою частиною сейсмічної станції, він гарантує її безперервну і

безперебійну роботу. Стабільне живлення сейсмістанції забезпечують батарейки або акумулятори. У сейсмістанціях є три активні споживачі енергії: АЦП, яке оцифровує аналоговий сигнал на кожному каналі з дискретністю 4000 відліків у секунду; система GPS; система контролю за якістю сейсмічних даних і технічного стану компонент сейсмістанції. Сумарне споживання — 0,08 А/год.

Батарейки Duracell Lr20, які використовують у деяких сейсмістанціях, мають велику масу, ціну та проблеми з утилізацією. Тому було вирішено використовувати пакет з 6 акумуляторів із загальною ємністю 12 000 мА/год. З таким запасом енергії станція працює близько 10 днів з постійно включеним модулем Wi-Fi. Крім внутрішніх акумуляторів передбачена можливість підключення зовнішнього живлення. В разі його приєднання блок живлення відключає внутрішні акумулятори і використовує енергію додаткових акумуляторів.

**Оперативна пам'ять.** У внутрішній оперативній пам'яті сейсмістанції накопичуються оцифровані сейсмічні дані. Через високу частоту дискретизації аналогового сигналу швидкість його запису у пам'ять має бути не менше 90 Мбіт/с. Тут формуються файли завдовжки 20 хв (рис. 12) і за-

писуються на картку пам'яті MicroSD. Розмір 20-хвилинного трикомпонентного файлу — 48 Мб. За один день безперервного запису створюється файл розміром у 3,5 Гб. За розміру пам'яті у 128 Гб можуть бути записані сейсмичні події упродовж 36 днів.

Структура файлів: PNT1 — номер станції (у цьому випадку — № 1), 171121 — рік, місяць, день, 121432 — година, хвилина, секунда (у часовому поясі UTM) (див. рис. 12).

**Система встановлення точного часу та координат GPS.** Після включення сейсмостанція загрузає програмне забезпечення та перевіряє працездатність усіх систем. На цьому етапі роботи вона звертається до супутникової системи GPS і отримує точний час й координати. Така процедура необхідна для узгодженої роботи всіх задіяних у польовій роботі сейсмостанцій. З отриманням точного часу автоматично корегується час сейсмостанції; ця корекція є індивідуальною для кожної станції. Кожна станція має роз'єм для підключення зовнішньої антени. Для робіт на відкритому просторі достатньо чутливості внутрішнього GPS-модуля. У разі обмеженої видимості неба, наприклад, у лісі, у місті, підвалі, необхідно використовувати зовнішню GPS-антену з підвищеною чутливістю до слабких супутникових сигналів.

**Системи зв'язку зі станцією: радіоканал, Wi-Fi, порт USB.** Наявність безпроводного зв'язку у пасивній системі реєстрації коливань дає змогу проводити моніторинг багатьох параметрів сейсмостанції і відслідковувати її технічний стан безпосередньо на точці спостереження (рис. 13). У наведеному вікні терміналу виводиться, наприклад, інформація про країну власника станції, час, дискретність на каналі за частотою, час останнього отримання

даних з GPS, координати розташування станції, розмір карти пам'яті, розмір і кількість записаних файлів, вольтаж внутрішніх акумуляторів і температура процесора. Безпроводна система необхідна для дистанційної зміни режимів роботи або примусового введення (виведення) її у стан «сну». Частими є ситуації, коли необхідно контролювати роботу станції, не маючи прямого до неї доступу, або у цілях безпеки не розкривати її місцезнаходження у густонаселеній місцевості, особливо взимку за снігу, який щойно випав. Для цього у сейсмичній станції встановлений модуль Wi-Fi. За його допомогою можна отримати повноцінний доступ до станції і копіювати на ноутбук, планшет чи смартфон накопичену інформацію зі швидкістю 100 Мб/с. За потреби на екрані ноутбука можна продивитись в онлайн-режимі коливання ґрунту, яке реєструють сейсмичні датчики. Якісний зв'язок зі станцією по Wi-Fi є на відстані 50 м. Програмування окремих станцій як точок доступу дає змогу формувати підмережі і мати доступ до віддалених станцій (рис. 14).

Для віддаленішого зв'язку в сейсмостанції передбачений модуль радіоканалу. Швидкість передачі даних менша, ніж у попередньому варіанті, а саме 9600 біт/с (швидкість передачі COM-порту), але відстань суттєво більша і залежно від певних чинників може сягати 1000 м. У такий спосіб, пересуваючись на машині й не під'їжджаючи близько до сейсмостанцій, можна контролювати їх роботу.

По завершенні польових робіт за допомогою системи Wi-Fi записані дані зчитуються з пам'яті сейсмостанцій у автоматичному режимі. Ноутбук (планшет, смартфон) відшуковує IP адреса сейсмичних станцій, які є в радіусі 50 м, створює базу доступних пристроїв і, без участі людини, переписує дані зі станції на зовнішні пристрої накопичення інформації. Для зчитування інформації також передбачений порт USB. Сейсмостанцію підключають до комп'ютера так само, як флешносій. Після ідентифікації комп'ютером нового пристрою можна копіювати сейсмичні дані.

Ім'я	Розмір	Тип	Змінено
PNT1_171121_121432.stm	48 000 KB	Winamp.File	20.10.2017 0:00
PNT1_171121_122430.stm	48 000 KB	Winamp.File	20.10.2017 0:00
PNT1_171121_125429.stm	48 000 KB	Winamp.File	20.10.2017 0:00
PNT1_171121_131429.stm	48 000 KB	Winamp.File	20.10.2017 0:00
PNT1_171121_132429.stm	48 000 KB	Winamp.File	20.10.2017 0:00
PNT1_171121_135429.stm	48 000 KB	Winamp.File	20.10.2017 0:00
PNT1_171121_141429.stm	48 000 KB	Winamp.File	20.10.2017 0:00
PNT1_171121_143429.stm	48 000 KB	Winamp.File	20.10.2017 0:00

Рис. 12. Імена RAW файлів із сейсмичними даними, записаними через 20 хв.



Рис. 13. Інформаційні вікна сейсмостанції: а — мережеві налаштування сейсмостанції; б — вікно терміналу з інформацією про робочий режим станції.

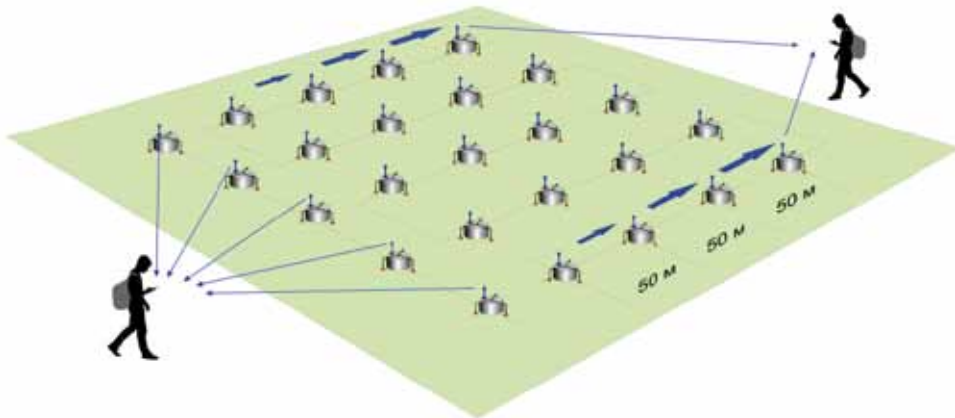


Рис. 14. Формування 3D полігона з автономних сейсмостанцій SV і контроль результатів тестування станцій.

### Технічні характеристики автономних сейсмостанцій

Розмір — 8,5×8,5×13 см.

Маса — 0,740 кг, з елементами живлення.

АЦП — 24 біта, 3 канала по 4000 Гц.

Оперативна пам'ять — 8÷128 Гб.

Підключення до комп'ютера — USB3.0.

Живлення — вбудовані акумулятори 12000 мА/год + зовнішні акумулятори.

Бездротовий зв'язок Wi-Fi — до 60 м (програмування роботи станцій, контроль за технічним станом, доступ до віддалених сейсмічних станцій, ...), швидкість передачі даних — 100 Мб/с.

Радіоканал зв'язку зі станцією — 1000 м, швидкість передачі даних 9,6 кб/с.

Система точного часу та визначення координат GPS і зовнішня антена.

Часові поправки — кожні 10 хв.

Час безперервної роботи на власних елементах живлення — до 10 днів.

### Використання сейсмостанцій SV для вивчення будови Землі під час реалізації проекту TESZ-2018.

Під час проведення міжнародного проекту TESZ-2018 сейсмічні станції серії SV використовували для запису хвильового поля, згенерованого наземними вибухами великої потужності, з метою вивчення явищ, пов'язаних із згасанням високочастотних складових сейсмічних хвиль у верхній частині сейсмічного розрізу. На пункті вибуху 7 біля с. Під'ярків (Львівська обл.) було закладено 400 кг вибухівки. Автономні сейсмостанції SV-2.1 і SV-2.2 були встановлені на лінії поширення сейсмічних хвиль від вибуху. Відстань станцій від епіцентру вибуху — 200 і 400 м відповідно. Обидві сейсмостанції були розташовані в однакових геологічних умовах (рис. 15, а). Після вибуху було

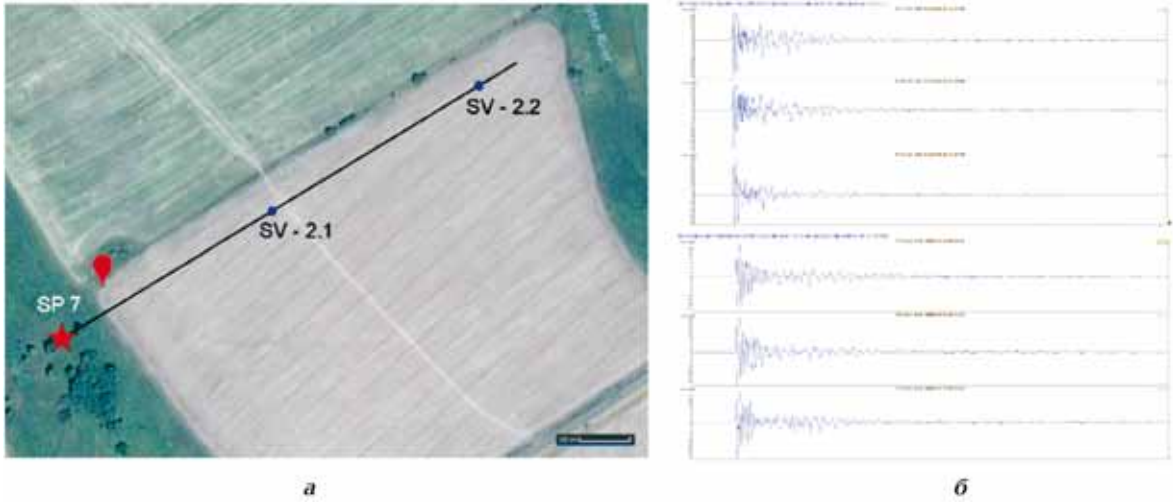


Рис. 15. Схематичне положення пункту вибуху 7 та сейсмостанцій SV-2.1, SV-2.2 (а) і трикомпонентні сейсмічні записи, одержані від хімічного вибуху (б).

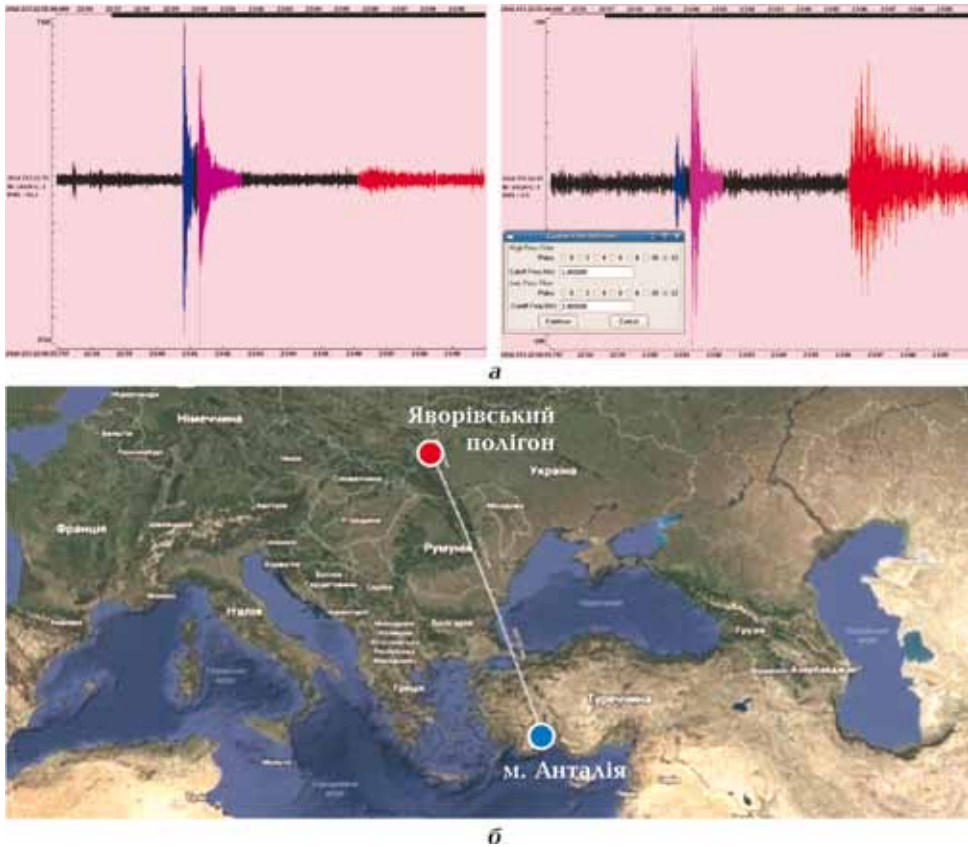


Рис. 16. Сейсмічні записи хвиль від хімічного вибуху на ПВ 6 і землетрусу (а) та карта з епіцентром землетрусу у м. Анталія (Туреччина) й місцем реєстрації землетрусу сейсмостанціями SV, с. Дубровиця (Львівська обл., Україна) (б).

зареєстровано сейсмічне хвильове поле (рис. 15, б), у якому крім вибухової хвилі були хвилі відбиття від геологічних горизонтів, які розміщуються під джерелом

вибуху на великих глибинах і мають найкоротший шлях до поверхні (до реєструвальної апаратури).

На пункті вибуху 6 поблизу с. Дубро-

виця (Львівська обл.) вивчали можливість використання сейсмостанцій як точного реєстратора моменту вибуху. Ідея полягала у фіксації моменту проходження електричного імпульсу по бойовій лінії до вибухівки, який би фіксувала котушка (дросель), підключена до сейсмостанції. Одноканальний варіант станції, який має точний час, виставлений за GPS, перетворює вхідний аналоговий сигнал електромагнітних імпульсів у дискретний масив (цифровий сигнал) з частотою до 16 000 Гц (тобто з точністю до 0,000 062 5 с). На цих пунктах вибуху сейсмостанції записували у тестовому режимі місцеві та віддалені сейсміко-сейсмологічні події, які відбуваються на великій відстані від місця проведення робіт ГСЗ. Так, після підземного вибуху (22 вересня 2018 р. у 0 год 30 хв) через 1 хв 30 с у м. Анталія (Туреччина) відбувся землетрус (рис. 16).

Відстань між Яворівським заповідником і м. Анталія становить близько 1500 км. Перша хвиля землетрусу була зареєстрована через 300 с після поштовхів у Турції. Отже, середня швидкість руху сейсмологічної хвилі в бік України становила 5 км/с.

Синім кольором на сейсмограмі позначено *P*-хвилю, фіолетовим — *S*-хвилю,

червоним — коливання ґрунту, пов'язані з віддаленим землетрусом. Після фільтрації і видалення високочастотних коливань залишилося хвильове поле сейсмологічного частотного діапазону (0—3 Гц).

**Вивчення геологічної будови окремих частин острова Зміїний сейсмічними методами та сейсмічного хвильового поля за різних метеорологічних умов.** Основна мета дослідницьких робіт — вивчити за допомогою приповерхневої сейсміки геологічну будову території, визначеної замовником робіт. Зокрема, встановити товщину осадових і перехідних порід (вивітрених), глибину залягання корінних порід, виявити наявність глибинних тріщин на території дослідження і оцінити можливості будівництва на цій території певних об'єктів. Оскільки острів складений давніми (палеозойськими) силікатними породами значної міцності — конгломерато-брекчіями з прошарками піщанико-кварцитів, для вивчення високочастотних складових сейсмічних коливань та їх згасання у тонких осадових породах у тестовому режимі було залучено і сейсмостанції серії SV як станції, які записують коливання з частотами до 4 кГц (рис. 17).

**Висновки.** За останні декілька років розроблено пасивні сейсмічні станції для



Рис. 17. Сейсмічні станції SV. Приклади геологічної будови та приповерхневих розломів, що відображені у хвильовому сейсмічному полі, отримані під час інженерно-дослідницьких робіт. Спектральний аналіз хвильового поля.



широкого кола прикладних і фундаментальних сейсмічних робіт. Ці станції автономні, малогабаритні та легкі, мають функції дистанційного контролю (у реальному часі) за їх технічним станом і якістю записаних сейсмічних даних та великий термін безперервної роботи. Під час розроблення сейсмічних станцій було враховано великий досвід зі створення сейсмологічного обладнання у відділі сейсмічності Карпатського регіону (м. Львів, керівник С. Т. Вербицький) Інституту геофізики НАН України.

Проведено тестові та порівняльні роботи з використанням сейсмостанцій Reftek 125A (Техас, США) і сейсмічного обладнання ДП «Укргеофізика», зокрема Полтавської геофізичної експедиції (Чернігівська обл., Варвуський р-н, Шостаківська нафтогазова площа).

**Подяка.** Автори висловлюють щирю подяку у сприянні та всебічній допомозі під час створення, тестування та польових випробувань сейсмічних станцій SV заступнику генерального директора ДП «Укргеофізика» Толкунову Анатолію Петровичу.

### Список літератури

- Мишаткин В. Н. Современные тенденции развития аппаратуры для сейсмических исследований. *Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: в 2 т. Труды региональной научно-технической конференции (Петропавловск-Камчатский, 11—17 ноября 2007 г.)*. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: Изд. Геофизической службы РАН, 2008. С. 131—134.
- Asudeh, I., Anderson, F., Parmelee, J., Vishnubhatla, S., Munro, P., & Thomas, J. (1992). *A Portable Refraction Seismograph PRSI I*. Geological Survey of Canada, Open File 2478. Lithoprobe Publication No 294.
- Burg, K. E. (1941). *Prospecting method and apparatus*. Patent 2265513 A.
- Dean, T., Tulett, J., & Barnwell, R. (2018). Nodal land seismic acquisition: The next generation. *EAGE*, 36(1), 47—52.
- Exploring the Earth's Crust: History and Results of Controlled-source Seismology. (2012). Publisher: The Geological Society of America Memoir, Claus Prodehl Geophysical Institute, University of Karlsruhe, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany Walter D. Mooney U.S. Geological Survey.
- Gao, Z. (Ed.). (1998). *Environmental Regulation of Oil and Gas*. London: Kluwer Law International.
- Grad, M., Gryn, D., Guterch, A., Janik, T., Keller, R., Lang, R., Lyngsie, S. B., Omelchenko, V., Starostenko, V. I., Stephenson, R. A., Stovba, S. M., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2003). «DOBRefraction'99»—velocity model of the crust and upper mantle beneath the Donbas Foldbelt (East Ukraine). *Tectonophysics*, 371(1-4), 81—110. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00211-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00211-7).
- Guterch, A., Grad, M., Keller, G. R., Posgay, K., Vozár, J., Špičák, A., Brückl, E., Hajnal, Z., Thybo, H., & Selvi, O. (2003). CELEBRATION 2000 seismic experiment. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 47, 659—669. <https://doi.org/10.1023/A:1024728005301>.
- Healy, J. H., Mooney, W. D., Blank, H. R., Gettings, M. E., Kohler, W. M., Lamson, R. J., & Leone, L. E. (1982). Saudi Arabian seismic deep-refraction profile. Final Proj. Rep., Saudi Arabian Deputy Minist. Miner. Resour., Open-File Rep., USGS OFR-02-37.
- Hsiao, K. H., & Yan, H. S. (2009). The review of reconstruction designs of Zhang Heng's seismoscope. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 9(4). [https://doi.org/10.5610/jae.9.4\\_1](https://doi.org/10.5610/jae.9.4_1).
- Kendall, R. (2015). *Cableless Seismic Acquisition*. Tesla Exploration LTD, Calgary.
- Keller, G. R., Karlstrom, K. E., Williams, M. L., Miller, K. C., Andronicos, C., Levander, A., Snelson, C., & Prodehl, C. (2005). The dynamic nature of the continental crust–mantle boundary: crustal evolution in the Southern Rocky Mountain region as an example. In: K. E. Karlstrom, & G. R. Keller (Eds.), *The Rocky Mountain Region: An Evolving Lithosphere — Tectonics, Geochemistry, and Geophysics* (pp. 403–420).

- Am. Geophys. Un. Monograph, Washington, D.C.
- Prodehl, C., Kennett, B., Artemieva, I. M., & Thybo, H. (2013). 100 years of seismic research on the Moho. *Tectonophysics*, 609, 9—44. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.036>.
- Prodehl, C., Mechie, J., Achauer, U., Keller, G. R., Khan, M. A., Mooney, W. D., Gaciri, S. J., & Obel, J. D. (1994). The KRISP 90 seismic experiment — a technical review. *Tectonophysics*, 236 (1-4), 33—60. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90168-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90168-6).
- Shave, D. G. (1982). Seismic group recorder system. *Conference Society of Exploration Geophysicists*, 45-46. <https://doi.org/10.1190/1.1827090>.
- Starostenko, V., Janik, T., Kolomiyets, K., Czuba, W., Šroda, P., Lysynchuk, D., Grad, M., Kovacs, I., Stephenson, R., Thybo, H., Artemieva, I. M., Omelchenko, V., Gintov, O., Kutas, R., Gryn, D., Guterch, A., Hegedus, E., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2013a). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PAN-CAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049—1072. doi:10.1016/j.tecto.2013.07.008.
- Starostenko, V., Janik, T., Lysynchuk, D., Šroda, P., Czuba, W., Kolomiyets, K., Aleksandrowski, P., Gintov, O., Omelchenko, V., Komminaho, K., Guterch, A., Tiira, T., Gryn, D., Legostaeva, O., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2013b). Mesozoic(?) lithosphere-scale buckling of the East European Craton in southern Ukraine: DOBRE-4 deep seismic profile. *Geophysical Journal International*, 195(2), 740—766. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt292>.
- Starostenko, V., Janik, T., Stephenson, R., Gryn, D., Rusakov, O., Czuba, W., Šroda, P., Lysynchuk, D., Grad, M., Guterch, A., Flüh, E., Thybo, H., Artemieva, I., Tolkunov, A., Sydorenko, G., Omelchenko, V., Kolomiyets, K., Legostaeva, O., Dannowski, A., & Shulgin, A. (2016). DOBRE-2 WARR profile: the Earth's crust across Crimea between the pre-Azov Massif and the northeastern Black Sea Basin. In: M. Sosson, R. A. Stephenson, & S. A. Adamia (Eds.), *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus* (Vol. 428, pp. 199—220). Geological Society, London, Special Publications. doi:10.1144/SP428.11.
- Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Czuba, W., Šroda, P., Lysynchuk, D., Aizberg, R., Garetzky, R., Karataev, G., Gribik, Y., Farfuliak, L., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., Komminaho, K., Tiira, T., Gryn, D., Guterch, A., Legostaeva, O., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2018). Lithospheric structure along wide-angle seismic profile GEORIFT 2013 in Pripyat-Dnieper-Donets Basin (Belarus and Ukraine). *Geophysical Journal International*, 212, 1932—1962. doi:10.1093/gji/ggx509.
- Starostenko, V. I., Janik, T., Yegorova, T., Farfuliak, L., Czuba, W., Šroda, P., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 201, 406—428. doi:10.1093/gji/ggv018.
- Wang, Z. D. (1963). *Ke Ji Kao Gu Lun Cong*. Beijing, China: Cultural Press (in Chinese).

## Autonomous digital seismic stations SV

*D. M. Gryn, S. T. Verbytsky, 2019*

Likewise historical review has been presented on development of autonomous seismic stations the most popular in Europe and North America used in large-scale international projects on studies of deep structure of the Earth during the latest 50 years. In addition up-to date passive and active seismic stations used in economic seismicity have been described. Seismic exploration is one of the most informative geophysical methods. It gives thorough information on deep and spatial structure of the Earth using features of seismic waves propagation in geological layers with different physical properties. Wave field excited with seismic source propagates in space and time, therefore for its registration we

need availability of many observation sites simultaneously resulting in considerable rise in prices cost of seismic information. In turn, absence of numerical seismic data renders impossible development of basic seismicity, seismic monitoring and long-term observation of seismically dangerous processes in big areas of man-made objects.

The paper presents autonomous seismic stations developed at the Institute of Geophysics NAS of Ukraine. Universality of seismic stations allows their use for a wide range of seismic and seismological problems. Small weight and size make their transportation easier as well as their mounting in unequipped observation sites in boggy hard-to-reach areas. Long-continued registration of seismic information and big capacity of operative internal memory makes possible their use for passive long-term observations. Several variants of wireless connection have been realized in seismic stations for control of technical condition of the station, inspection of seismic record quality in real time and remote programming for alternation its working regime.

**Key words:** autonomous seismic station, seismic monitoring, seismograms, geological structure, digital record.

### References

- Mishatkin, V. N. (2008). Modern trends in the development of equipment for seismic research. In *Geophysical monitoring and seismic safety issues in the Russian Far East: Proc. of the regional scientific and technical conference (Petropavlovsk-Kamchatsky, November 11—17, 2007)* (Vol. 2, pp. 131—134). Moscow-Obninsk: Publ. House Geophysical Survey RAS (in Russian).
- Asudeh, I., Anderson, F., Parmelee, J., Vishnubhatla, S., Munro, P., & Thomas, J. (1992). *A Portable Refraction Seismograph PRSI I*. Geological Survey of Canada, Open File 2478. Lithoprobe Publication No 294.
- Burg, K. E. (1941). *Prospecting method and apparatus*. Patent 2265513 A.
- Dean, T., Tulett, J., & Barnwell, R. (2018). Nodal land seismic acquisition: The next generation. *EAGE*, 36(1), 47—52.
- Exploring the Earth's Crust: History and Results of Controlled-source Seismology. (2012). Publisher: The Geological Society of America Memoir, Claus Prodehl Geophysical Institute, University of Karlsruhe, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany Walter D. Mooney U.S. Geological Survey.
- Gao, Z. (Ed.). (1998). *Environmental Regulation of Oil and Gas*. London: Kluwer Law International.
- Grad, M., Gryn, D., Guterch, A., Janik, T., Keller, R., Lang, R., Lyngsie, S. B., Omelchenko, V., Starostenko, V. I., Stephenson, R. A., Stovba, S. M., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2003). «DOBREfrac-tion'99»—velocity model of the crust and upper mantle beneath the Donbas Foldbelt (East Ukraine). *Tectonophysics*, 371(1-4), 81—110. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00211-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00211-7).
- Guterch, A., Grad, M., Keller, G. R., Posgay, K., Vozár, J., Špičák, A., Brückl, E., Hajnal, Z., Thybo, H., & Selvi, O. (2003). CELEBRATION 2000 seismic experiment. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 47, 659—669. <https://doi.org/10.1023/A:1024728005301>.
- Healy, J. H., Mooney, W. D., Blank, H. R., Gettings, M. E., Kohler, W. M., Lamson, R. J., & Leone, L. E. (1982). Saudi Arabian seismic deep-refraction profile. Final Proj. Rep., Saudi Arabian Deputy Minist. Miner. Resour., Open-File Rep., USGS OFR-02-37.
- Hsiao, K. H., & Yan, H. S. (2009). The review of reconstruction designs of Zhang Heng's seismoscope. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 9(4). [https://doi.org/10.5610/jaee.9.4\\_1](https://doi.org/10.5610/jaee.9.4_1).
- Kendall, R. (2015). *Cableless Seismic Acquisition*. Tesla Exploration LTD, Calgary.
- Keller, G. R., Karlstrom, K. E., Williams, M. L., Miller, K. C., Andronicos, C., Levander, A., Snelson, C., & Prodehl, C. (2005). The dynamic nature of the continental crust–mantle boundary: crustal evolution in the Southern Rocky Mountain region as an example. In: K. E. Karlstrom, & G. R. Keller (Eds.), *The Rocky Mountain Region: An Evolving Lithosphere — Tectonics, Geochemistry, and Geophysics* (pp. 403–420). Am. Geophys. Un. Monograph, Washington, D.C.

- Prodehl, C., Kennett, B., Artemieva, I. M., & Thybo, H. (2013). 100 years of seismic research on the Moho. *Tectonophysics*, 609, 9—44. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.036>.
- Prodehl, C., Mechie, J., Achauer, U., Keller, G. R., Khan, M. A., Mooney, W. D., Gaciri, S. J., & Obel, J. D. (1994). The KRISP 90 seismic experiment — a technical review. *Tectonophysics*, 236 (1-4), 33—60. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90168-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90168-6).
- Shave, D. G. (1982). Seismic group recorder system. *Conference Society of Exploration Geophysicists*, 45-46. <https://doi.org/10.1190/1.1827090>.
- Starostenko, V., Janik, T., Kolomiyets, K., Czuba, W., Šroda, P., Lysynchuk, D., Grad, M., Kovacs, I., Stephenson, R., Thybo, H., Artemieva, I. M., Omelchenko, V., Gintov, O., Kutas, R., Gryn, D., Guterch, A., Hegedus, E., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2013a). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PAN-CAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049—1072. doi:10.1016/j.tecto.2013.07.008.
- Starostenko, V., Janik, T., Lysynchuk, D., Šroda, P., Czuba, W., Kolomiyets, K., Aleksandrowski, P., Gintov, O., Omelchenko, V., Komminaho, K., Guterch, A., Tiira, T., Gryn, D., Legostaeva, O., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2013b). Mesozoic(?) lithosphere-scale buckling of the East European Craton in southern Ukraine: DOBRE-4 deep seismic profile. *Geophysical Journal International*, 195(2), 740—766. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt292>.
- Starostenko, V., Janik, T., Stephenson, R., Gryn, D., Rusakov, O., Czuba, W., Šroda, P., Lysynchuk, D., Grad, M., Guterch, A., Flüh, E., Thybo, H., Artemieva, I., Tolkunov, A., Sydorchenko, G., Omelchenko, V., Kolomiyets, K., Legostaeva, O., Dannowski, A., & Shulgin, A. (2016). DOBRE-2 WARR profile: the Earth's crust across Crimea between the pre-Azov Massif and the northeastern Black Sea Basin. In: M. Sosson, R. A. Stephenson, & S. A. Adamia (Eds.), *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus* (Vol. 428, pp. 199—220). Geological Society, London, Special Publications. doi:10.1144/SP428.11.
- Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Czuba, W., Šroda, P., Lysynchuk, D., Aizberg, R., Garetzky, R., Karataev, G., Gribik, Y., Farfuliak, L., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., Komminaho, K., Tiira, T., Gryn, D., Guterch, A., Legostaeva, O., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2018). Lithospheric structure along wide-angle seismic profile GEORIFT 2013 in Pripjat-Dnieper-Donets Basin (Belarus and Ukraine). *Geophysical Journal International*, 212, 1932—1962. doi:10.1093/gji/ggx509.
- Starostenko, V. I., Janik, T., Yegorova, T., Farfuliak, L., Czuba, W., Šroda, P., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 201, 406—428. doi:10.1093/gji/ggv018.
- Wang, Z. D. (1963). *Ke Ji Kao Gu Lun Cong*. Beijing, China: Cultural Press (in Chinese).