

Автоматизована підсистема обробки та аналізу даних сейсмічних спостережень Карпатського регіону

С. Т. Вербицький, Ю. Т. Вербицький, О. Т. Стецьків, І. М. Ніщіменко, 2019

Відділ сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики
ім. С. І. Субботіна НАН України, Львів, Україна
Надійшла 14 грудня 2018 р.

Представлено описание системы сейсмических наблюдений Карпатского региона, схему работы центра сбора и обработки сейсмической информации, концепцию региональной базы сейсмологических данных Карпатского региона. Показаны принципы использования системы управления базой данных в качестве основного инструмента сохранения и манипуляции сейсмологической информации. Описана разработка и внедрение ряда программных средств, которые существенно улучшают процесс ввода, редактирования, анализа, графического и документального представления сейсмологической информации. Рассмотрена работа подсистемы обработки и анализа данных центра обработки и хранения сейсмологических данных системы сейсмических наблюдений Карпатского региона. Показана работа автоматического распознавания сейсмических событий на базе разработанного модуля программного ассоциатора «SEISMIC ASSOCIATOR». Описаны интерфейс разработанного программного пакета по обработке и анализу сейсмических данных и его модули. Представлены разработанные средства визуального анализа и коррекции параметров сейсмического события. Реализована возможность получения отчетной документации, которая позволяет создавать сейсмологические бюллетени за выбранный промежуток времени наблюдений, а также создание карты расположения эпицентров сейсмических событий, выбранных по определенным критериям и отображения полученных результатов с помощью службы «Google maps». Реализована возможность сопоставления эпицентров сейсмических событий с расположением местных разломных структур. Показано как автоматизированная подсистема обработки и анализа сети сейсмических наблюдений Карпатского региона обработки позволяет проводить комплексный анализ сейсмологической информации, а также по мере накопления данных дает возможность более точно оценить региональные закономерности, уточнить местные годографы сейсмических волн, выяснить энергетические зависимости в исследуемом регионе.

Ключевые слова: обработка данных, Earthworm, ассоциатор сейсмических событий, база сейсмических данных.

Вступ. На сьогодні спільною загальною рисою для міжнародних і національних сейсмологічних мереж спостережень є впровадження інформаційних технологій для автоматизації збору та накопичення інформації. Цьому сприяють як розвиток і здешевлення засобів зв'язку, так і розширення покриття цих мереж й підвищення доступності послуг зв'язку. Це дає змогу оперативно збирати і передавати глобальну інформацію, а також розширює можли-

вості у сфері систематизації та зберігання геофізичної інформації. Сучасні інформаційні технології значно спрощують реалізацію завдань, пов'язаних з обробкою збереженої інформації, її подальшим аналізом, а також знижують витрати на пошук і зберігання даних.

Опис системи сейсмічних спостережень Карпатського регіону. Зазначена система працює в режимі віртуальної мережі, що з технічних і фінансових при-

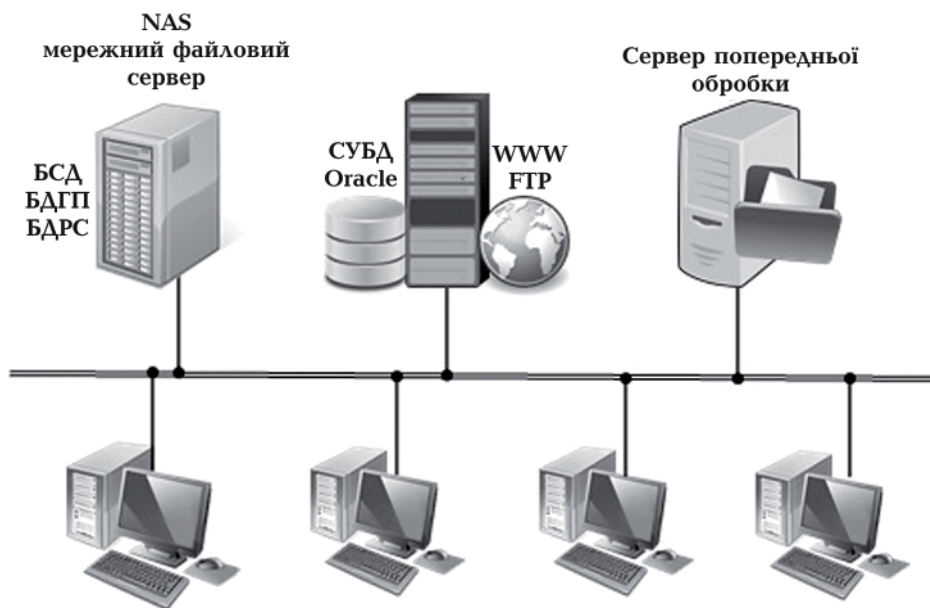


Рис. 1. Принципова схема центру збору і обробки сейсмологічної інформації.

чин є доцільнішим. Сучасні можливості передачі даних та суттєве підвищення швидкості їх отримання в лініях звичайного зв'язку дає змогу забезпечити якісну реалізацію такого рішення. При цьому вдається локалізувати подію та визначити її параметри у мінімальний термін, що відповідає можливостям аналогічної фізичної мережі. При виборі конфігурації мережі був використаний міжнародний та вітчизняний досвід розгортання мереж сейсмічних спостережень та враховано сучасні вимоги до реалізації дослідницьких завдань: гнучкість у налаштуваннях, можливість постійного удосконалення і уніфікація складових системи збору, обробки, збереження та передачі даних [Асламбекова и др., 1995].

У системі спостережень можна виділити два рівні — віддалені пункти сейсмічних спостережень (ВПСС) та центр збору і обробки сейсмологічних даних (ЦЗОСД), з'єднані між собою каналами зв'язку. На цей час мережа складається з віддалених пунктів сейсмічних спостережень, обладнаних системами збору DAS-05, що працюють у режимі накопичення інформації, і забезпечених online-Internet зв'язком. Вони напряму зв'язані із сервером обробки та архівування даних ЦЗОСД, який

розташований на сейсмічній станції (СС) «Львів» (рис. 1).

За результатами аналізу існуючих банків сейсмологічних даних розроблено концепцію регіональної бази сейсмологічних даних (РБСД) Карпатського регіону [Вербицкий, Стецьків и др., 2009]. Її суть полягає у використанні системи управління базою даних (СУБД) як основного інструменту збереження і маніпуляції сейсмологічною інформацією. При цьому найбільш ефективним і перспективним шляхом побудови комплексних систем є інтеграція на основі єдиної бази даних. Реалізація і розвиток такого комплексу, що містить весь набір програм, необхідних для використання та інтерпретації єдиної бази даних, дають змогу інтерактивно оперувати даними у довільних співвідношеннях і розрізах, а наявність розвинутих засобів математичного моделювання — створювати альтернативні конкуруючі моделі, що допомагає по-різному оцінювати особливості геофізичних процесів [Асламбекова и др., 1995; Гордеев и др., 2004; Кендзера и др., 2004]. Згідно з цією концепцією, створено базу сейсмологічних даних (БСД), а також розроблено і впроваджено програмні засоби, в тому числі програму автоматизованої попередньої обробки «SEISMIC ASSOCIATOR»

та інтерфейс користувача БД, які істотно поліпшили процеси вводу, редагування, аналізу і графічного та документального подання сейсмологічної інформації.

Автоматизована частина системи реалізована на базі програмного забезпечення нового покоління, за основу якого був взятий пакет EARTH WORM [http://www.isti.com/products/earthworm/]. Система EARTH WORM є програмним комплексом, що складається з двох основних частин: автоматичної, яка забезпечує збір і обробку сейсмологічної інформації в режимі реального часу, та інтерактивної, яка забезпечує доступ користувачів до отри-

маної інформації. Пакет EARTH WORM базується на СУБД Oracle [Гаршин, 2000].

Вибір саме цієї БД був спричинений використанням системи EARTH WORM як базової при розробці систем збору DAS-05, якими обладнані пункти сейсмічних спостережень Карпатської сейсмічної мережі, і як системи спостережень реального часу. Використання системи Oracle як СУБД не є принциповим питанням. СУБД — одна з найпотужніших систем, але вона немає принципових обмежень щодо використання інших СУБД, таких як MySQL, Sybase тощо. У такому разі основними критеріями при виборі СУБД є надійність, забезпечен-

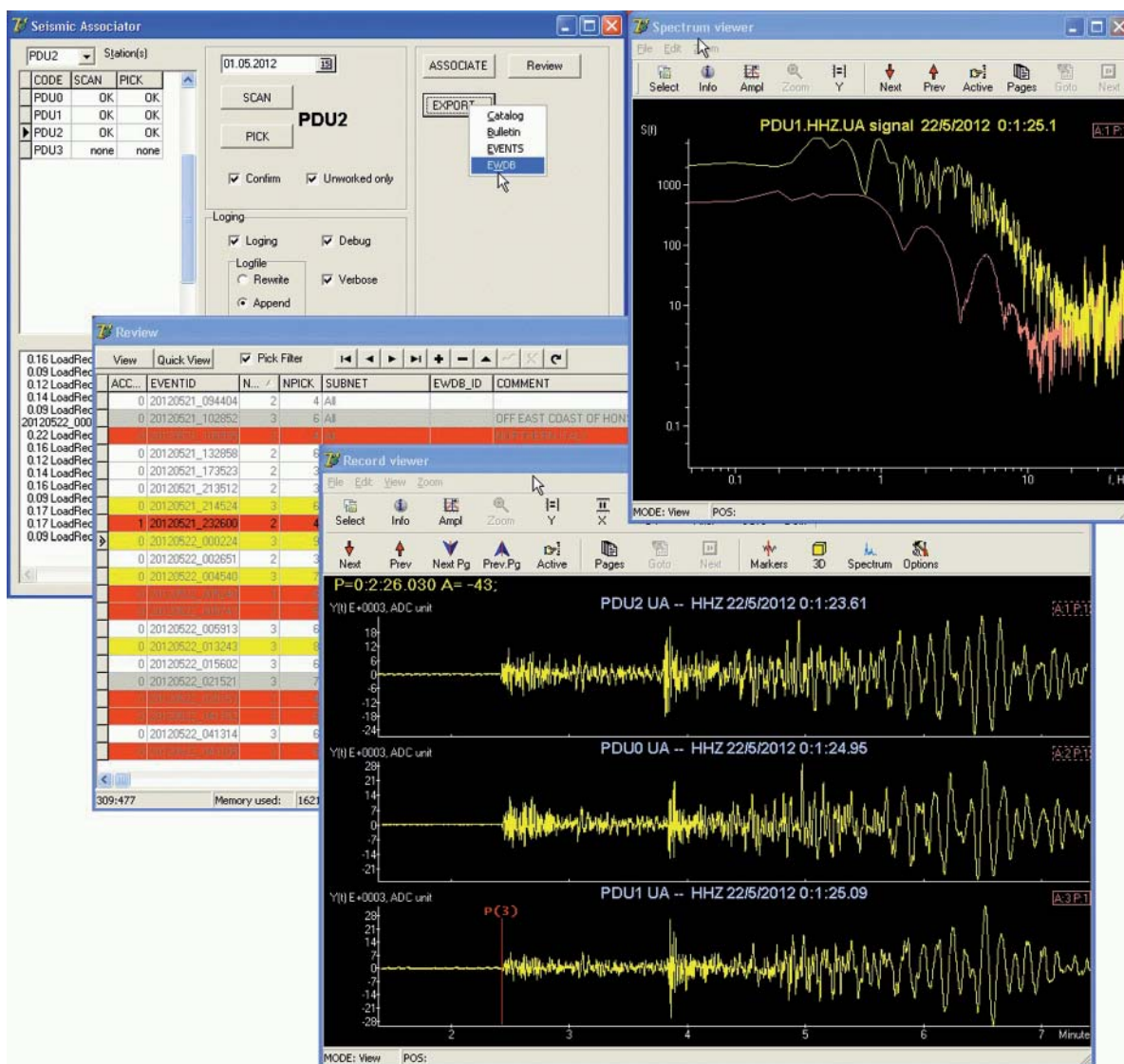


Рис. 2. Інтерфейс програми «SEISMIC ASSOCIATOR».

ня багатокористувацького доступу та підтримка великих обсягів даних.

Використання та апробація цього програмного комплексу досить тривалий час дали змогу виділити його безперечні переваги, а також певні недоліки.

Безумовні переваги системи такі:

- модульність: кожен функцію систем виконує окремий модуль, який може функціонувати незалежно від інших модулів; при цьому найкритичніші системні функції повністю незалежні від інших функцій системи;
- системна незалежність: модулі системи можуть працювати на різних комп'ютерних платформах і операційних системах;
- програмне забезпечення безкоштовне, всі початкові коди є у вільному доступі, що дає принципову змогу вносити зміни у функціональність системи;

• підтримка різних пристроїв і систем збору сейсмологічної інформації: система включає набір модулів для отримання даних з декількох типів серійних пристроїв і систем збору сейсмологічної інформації; підключення нових пристроїв не становить труднощів і потребує лише створення додаткового інтерфейсного модуля;

• наявність потужної системи діагностики, генерування і передачі повідомлень.

Поряд з цим система EARTHWORK має недоліки [Johnson et al., 1995], основними з яких є відсутність зручного інтерфейсу користувача й обмежений набір операцій з даними. На жаль, у системі бракує зручних і звичних засобів аналізу даних. Вище зазначено, що в системі EARTHWORK використовують комерційну систему DBMS Oracle [Гаршин, 2000]. У зв'язку з цим програмний пакет було адаптовано до кон-

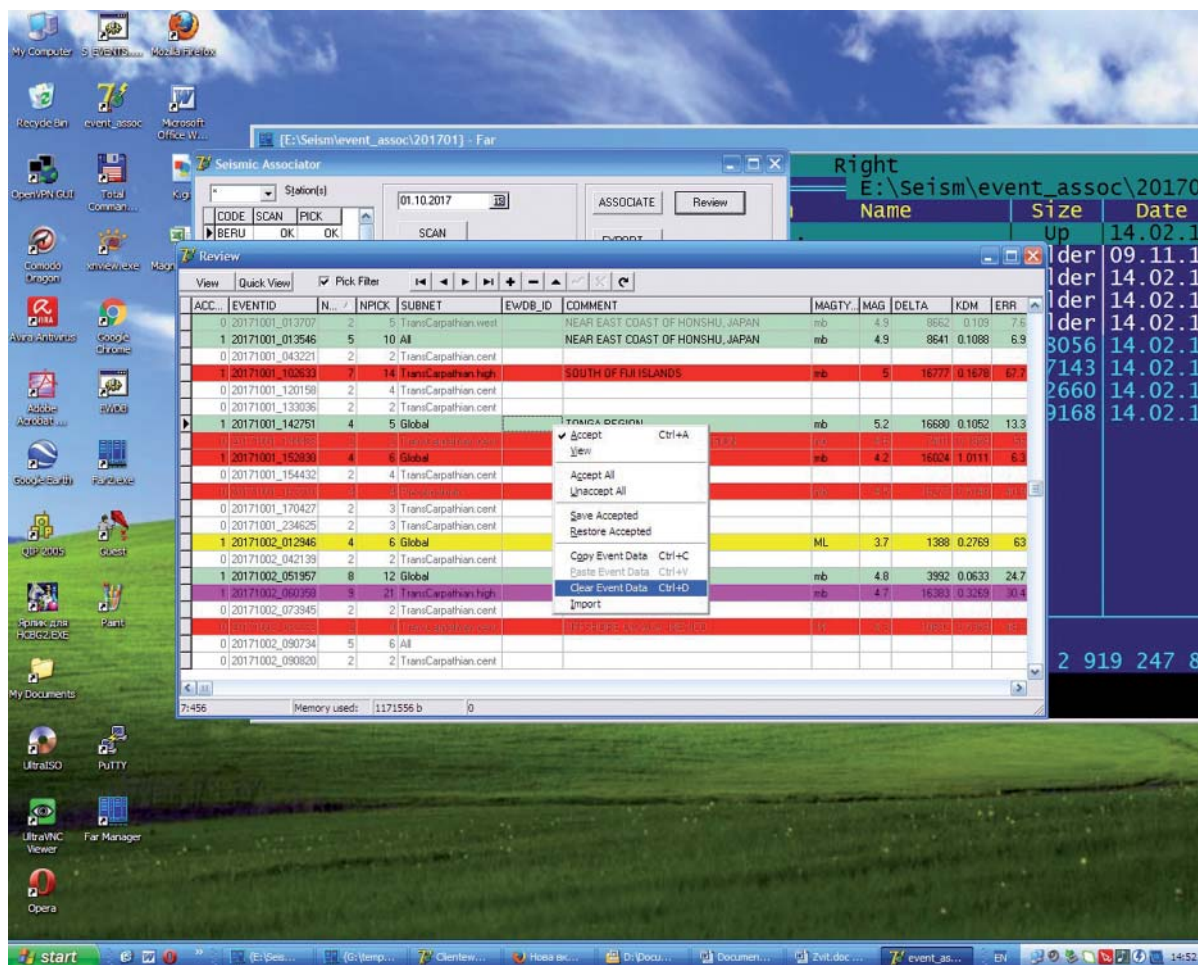


Рис. 3. Вікно допоміжних команд програми «SEISMIC ASSOCIATOR».

кретних умов, зокрема забезпечено додатковою функціональністю, що відсутня у стандартній реалізації.

Розробка та опис програмного забезпечення. В процесі визначення прийнятнішого програмного рішення було виконано такі завдання:

- створення та апробація модуля програмного асоціатора, який забезпечує автоматичне розпізнавання сейсмічних подій в потоці отриманих даних;
- розробка і тестування інтерфейсу користувача, що включає програмні модулі, які забезпечують створення, модифікацію, аналіз і відображення даних.

Під час збору сейсмологічної інформації на файловому сервері попередньої обробки даних формується архів хвильових форм (АХВ) — файли, згруповані у спеціальній структурі каталогів, згідно з місцем

і часом реєстрації. Для заміни рутинної та довготривалої роботи з обробки та виділення з АХВ сейсмічних подій було розроблено програму «SEISMIC ASSOCIATOR» (рис. 2). Програма реєструє хвильові форми у тимчасовій базі даних (SCAN), після чого відбувається детектування перших (P) сейсмічних фаз (PICK). Цей етап повністю автоматичний і може тривати від години до декількох днів, залежно від кількості станцій, що обробляються. Далі програма ототожнює (асоціює) групи фаз у сейсмічні події (ASSOCIAT). Програма дає змогу гнучко налаштувати режим асоціації подій, використовуючи принцип підмереж. Згідно з цим принципом, всю сейсмологічну мережу розбиваємо на ієрархічну структуру підмереж, кожна з яких належить до окремої сейсмогенної зони і має власні налаштування асоціації подій, такі

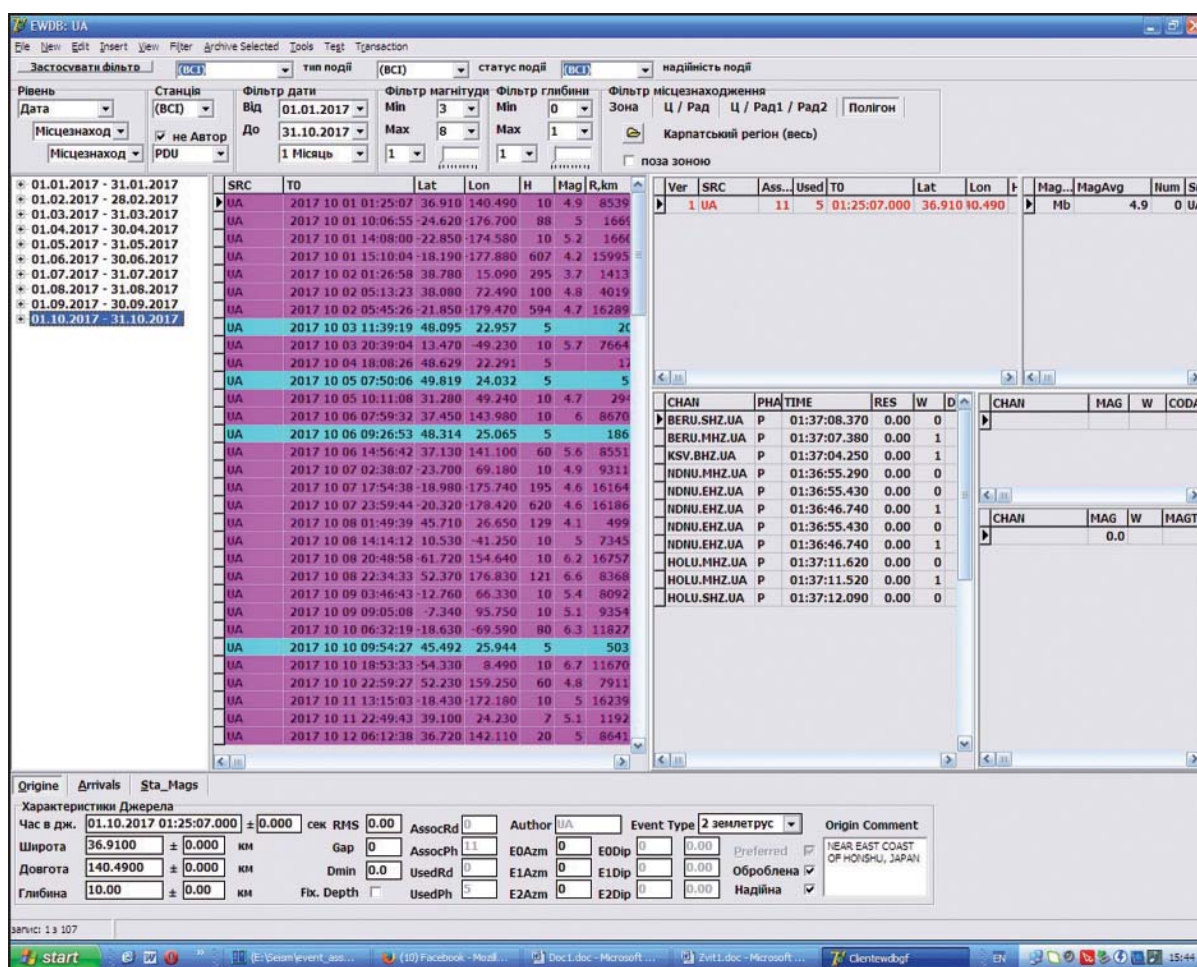


Рис. 4. Вікно інтерфейсу БД після експорту даних з програми «SEISMIC ASSOCIATOR».

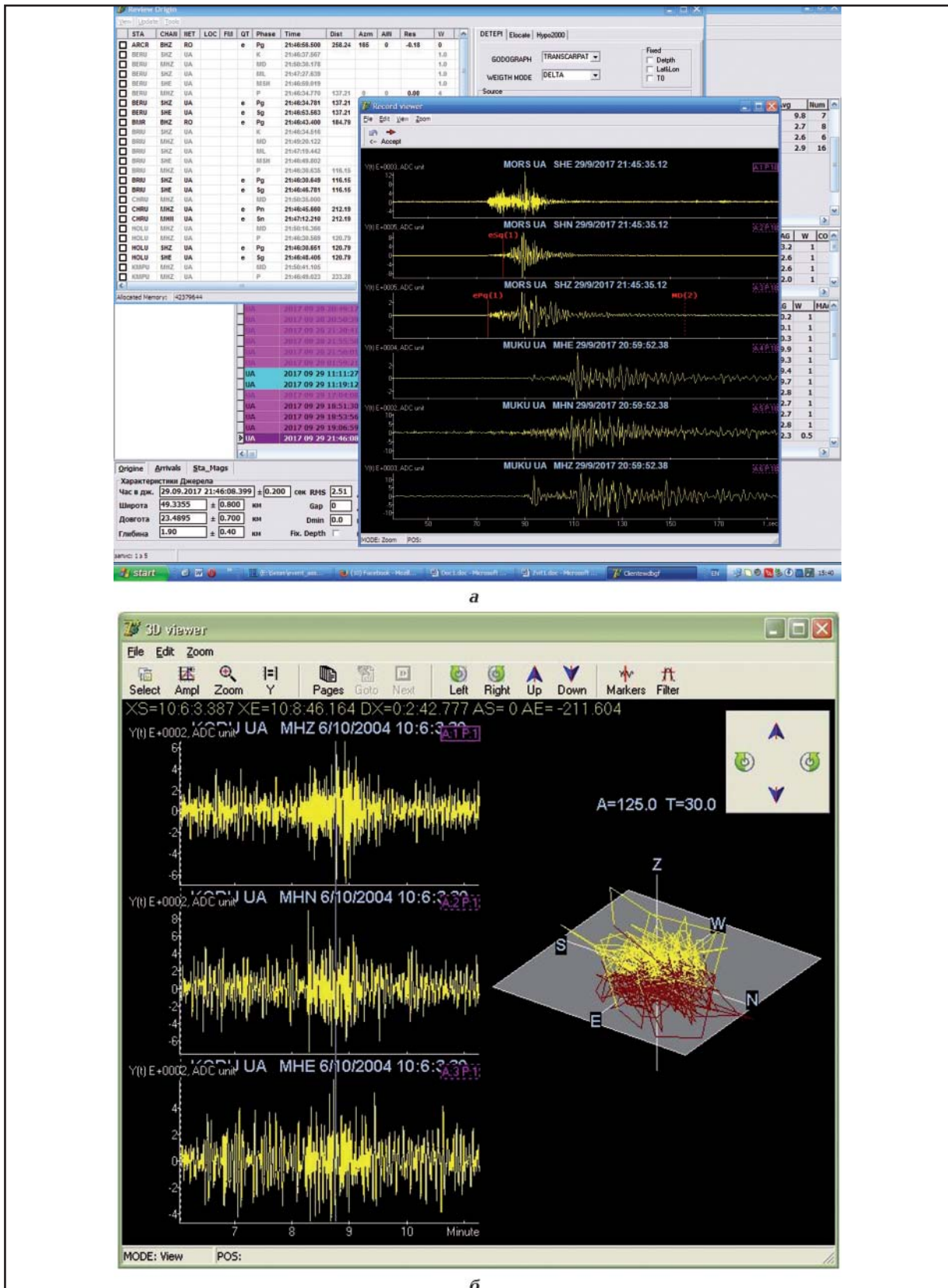


Рис. 5. Вікно модуля інтерактивної обробки даних: *a* — редагування міток основних фаз сейсмічного сигналу; *б* — 3D аналіз сигналу для уточнення положення фаз.

як мінімальна кількість реєструвальних пунктів сейсмічного спостереження (ПСС) і розмір часового вікна.

Таким чином, розв'язано проблему недостатньої щільності мережі в окремих компактних сейсмогенних зонах, оскільки програму можна налаштувати на виділення сейсмічних подій навіть за одним ПСС. Одержані дані теж реєструємо у тимчасовій БД. Усі згадані вище дії повністю автоматизовані. На цьому етапі вже отримуємо певну кількість подій, які можуть бути як хибними так і правдивими. У зв'язку з цим у програмі реалізовано інтерфейс користувача (рис. 3), що дає змогу оператору виконати попередній аналіз даних, розділити фальшиві спрацьовування, телеподії, регіональні та локальні сейсмічні події і відкинути ті з них, що не становлять інтересу. У програмі також передбачено ототожнення у напівавтоматичному режимі зареєстрованих телесеїсмічних і регіональних подій з інтернет-каталогами (EMSC, ISC, USGS). Для цього програмою імпортується каталог сейсмічних подій з EMSC. У процесі цього імпортування програма враховує декілька критеріїв для точнішого ототожнення сейсмічних подій. До цих критеріїв належать: магнітуда, відстань до епіцентру, час проходження хвиль (похибка). Чим вища

магнітуда і менша відстань до епіцентру та похибка проходження хвиль, тим подія є надійнішою. Згаданий принцип програма реалізує у вигляді виділення подій різними кольорами залежно від надійності: від зеленого (найбільш надійна) до червоного (менш надійна).

Останній етап роботи програми, найбільш відповідальний і громіздкий, повністю проводить оператор. Він переглядає всі події і залишає тільки ті з них, що становлять інтерес для подальшої обробки. Після первинної обробки зберігається каталог відібраних сейсмічних подій. Існує можливість зберігати декілька різних таких каталогів. Результати попереднього аналізу у вигляді параметрів виділених сейсмічних подій (сейсмічні фази) та відповідних хвильових форм експортують у базу сейсмічних даних (БСД). Крім безпосереднього експортування в БСД створюють каталог і бюлетень (за потреби), а також резервне копіювання у вигляді каталогу файлів.

Подальша робота з аналізу та класифікації отриманих сейсмічних подій відбувається за допомогою розробленого інтерфейсу користувача БСД (рис. 4).

Інтерфейс користувача БСД забезпечує можливість працювати декільком користувачам над однією подією, не заважаючи

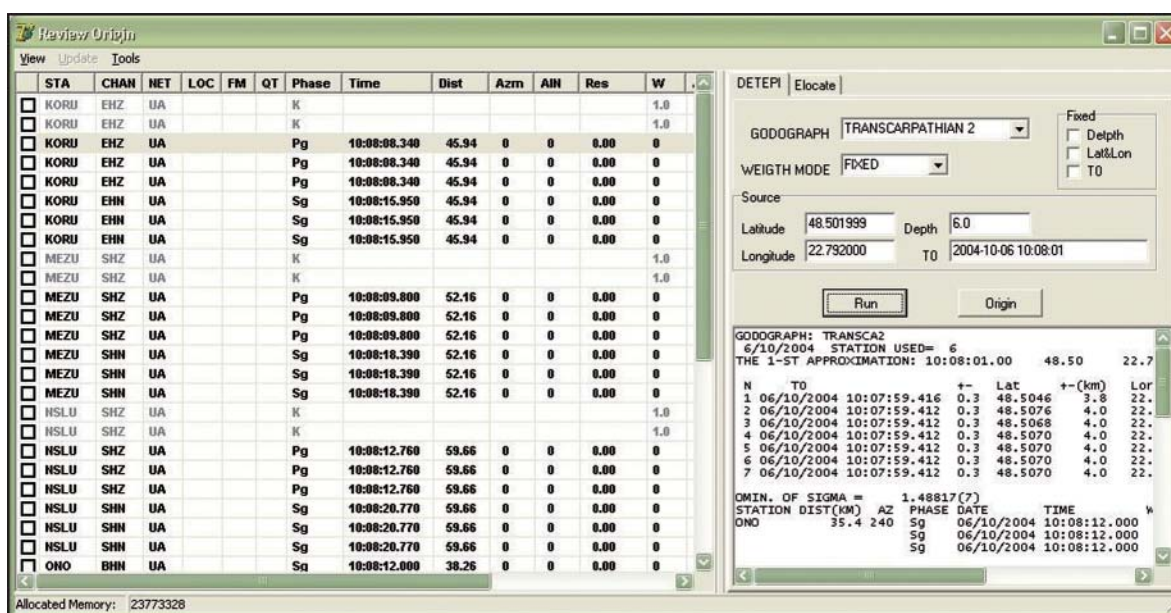


Рис. 6. Приклад аналізу сейсмічної події зовнішньою програмою обробки.

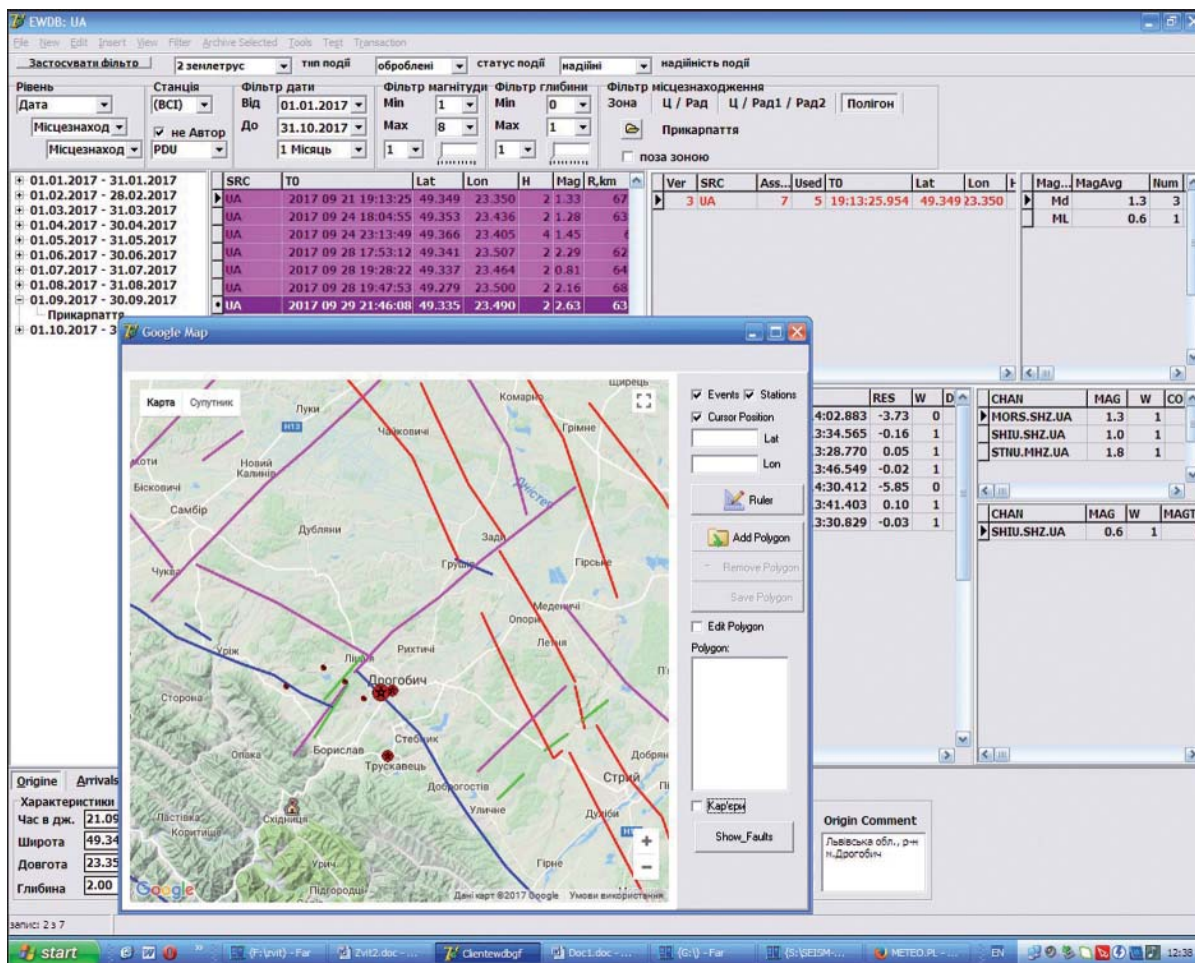


Рис. 7. Приклад виведення на карту епіцентрів сейсмічних подій та ліній розломів.

один одному. Якщо подія матиме декілька розв'язків, їх можна порівняти і вибрати кращий.

Для обробки регіональних сейсмічних подій потрібно вносити до бази дані з інших сейсмічних мереж. Для цього у програмі реалізована відповідна можливість вносити не тільки параметричні дані, а й окремі записи хвильових форм.

У програмі також передбачена можливість архівування даних на виділений сервер.

Розроблений інтерфейс користувача складається з декількох модулів:

- внесення та зміна інформації про інфраструктуру мережі пунктів спостереження;
- створення та модифікація даних;
- формування та виконання запитів;
- модуль інтерактивної обробки даних;
- побудова звітної документації;

- відображення подій на інтерактивних картах Google maps;

- формування даних для використання у зовнішніх системах обробки, а також внесення в базу даних результатів обробки.

Модуль для внесення та зміни даних щодо інфраструктури мережі пунктів спостереження дає змогу вносити у базу даних інформацію про інфраструктуру мережі пунктів спостереження та характеристики реєструвальних каналів. У базі даних зафіксовано всі переміщення станцій, період їх роботи та зміни в обладнанні.

Модуль інтерактивної обробки даних надає оператору засоби візуального аналізу та за потреби корекції параметрів сейсмічної події. Приклади вікон програмного модуля показано на рис. 5.

У результаті інтерактивної обробки

сейсмологічних даних отримуємо:

- уточнені параметри зареєстрованих сейсмічних подій;
- виділені землетруси серед інших сейсмічних подій природного та сейсмічного характеру (зсуви, вибухи тощо);
- поглиблену обробку даних (уточнення координат і глибини епіцентру події).

Модуль формування та виконання запитів до БСД дає змогу проводити необхідну вибірку сейсмічних подій для аналізу. Для здійснення маніпуляцій в межах такого значного масиву даних істотну роль відіграє можливість розподілу його на максимальну кількість однорідних масивів згідно із заданими параметрами, внаслідок чого легко вести пошук, виділяти і аналізувати отримані дані. Застосувавши розроблений нами інтерфейс користувача, можна виділити події згідно з додатковою параметричною інформацією, яку отримуємо разом із записами хвильових форм, а також на підставі інформації про інфраструктуру мережі пунктів спостереження, на яких зареєстровано вказані події, та про характеристики відповідних каналів.

При цьому операція фільтрації забезпечує такі можливості виділення масивів даних:

- згідно з гіпоцентральною параметрами сейсмічних подій (дата і час, магнітуда, глибина);
- згідно з епіцентральною параметрами сейсмічних подій (вибірка у прямокутній, радіальній або полігональній області);
- відповідно до пункту спостереження (мережа, станція, канал).

Запроваджено ієрархічну систему відображення даних, за допомогою якої легко виділити необхідну вибірку у розрізі того чи іншого параметра, а потім додатково її аналізувати.

За допомогою інтерфейсу також реалізовано виклик зовнішніх програм обробки, у які передають масиви сейсмічних даних. Для цього використовують пакет Matseis [Hart, Young, 2004], побудований на основі добре розвинутого програмного пакета MatLab. Середовище Matlab має добре розвинуті графічні бібліотеки функ-

цій та вбудовані засоби для аналізу даних і різноманітних графічних побудов, а також широкий спектр функцій для обробки сигналів (Signal Processing Toolbox) [Sleeman, T. van Eck, 1999].

На рис. 6 відображено розрахунок розташування епіцентру сейсмічної події за допомогою зовнішньої програми обробки.

Модуль формування звітної документації та відображення сейсмічних подій на інтерактивній карті. У програмі реалізовано можливість отримання звітної документації, що базується на спеціальних шаблонах у форматі MS Excel. Це, наприклад, дає змогу створювати сейсмологічні бюлетені за вибраний проміжок часу спостережень. Додатково за допомогою програми можна створити карту розташування епіцентрів сейсмічних подій, вибраних за певними критеріями. Цей модуль реалізований на базі інтерактивних карт Google maps. До програми також було під'єднано базу розміщення розломних структур. За потреби їх легко можна вивести на карту і застосовувати при визначенні епіцентрів.

На рис. 7 показано приклад виведення на карту епіцентрів сейсмічних подій, вибраних за заданим полігоном (Прикарпаття) за певний проміжок часу. Це поштовхи в районі м. Стебник Львівської області. Для полегшення визначення епіцентрів вибухів було створено базу даних кар'єрів, яка продовжує наповнюватись.

Висновки. Автоматизована підсистема обробки та аналізу ЦЗОСД мережі сейсмічних спостережень Карпатського регіону обробки дає змогу проводити комплексний аналіз сейсмологічної інформації. В міру нагромадження даних є можливість точніше оцінити регіональні закономірності, уточнити місцеві годографи сейсмічних хвиль, з'ясувати енергетичні залежності у досліджуваному регіоні. За комплексним аналізом загальної сукупності сейсмічних даних можна визначити параметри місцевої сейсмічності та динамічні параметри місцевих землетрусів, вказати на ймовірні механізми виникнення сейсмічних подій в регіоні.

Список літератури

- Асламбекова И. П., Инчин А. С., Ким Э. Ф., Курбангалиев Н. М., Погорельцева И. В. Реализация комплексной обработки данных в сейсмомониторинге: Тез. докл. юбилейной науч. конф., посвященной 50-летию развития математики в Академии наук Казахстана. Алматы, 1995, С. 34.
- Вербицкий С. Т., Стецьків А. Т., Вербицкий Ю. Т., Рожок Н. И., Стасюк А. Ф., Пронишин Р. С. Система сбора, обработки и анализа сейсмологических данных Карпатского региона. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 1. С. 125—132.
- Гаршин И. К. Практика работы с Oracle: генерация, администрирование, репликация. Москва: Изд. ООО «Фирма «ПОЛТЕКС», 2000. 250 с.
- Гордеев Е. И., Чебров В. Н., Дроздин Д. В., Козырева Н. П., Левина В. И., Сергеев В. А., Сенюков С. Л., Ящук В. В. Сбор, обработка и хранение сейсмологической информации. В сб.: *Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки*. Петропавловск-Камчатский: Изд. Камчатского филиала Геофизической службы РАН, 2004. С. 43—61.
- Инчин А. С. Математические и методические аспекты комплексного анализа данных наблюдений при оценке сейсмической опасности. В кн.: *Космические исследования в Казахстане*. Алматы: РОНД, 2002. С. 373—382.
- Кендзера О. В., Вербицкий С. Т., Стасюк А. Ф., Вербицкий Ю. Т., Олещук Є. І. Удосконалення системи збору сейсмологічної інформації в Карпатському регіоні. В зб.: *Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (бувівництво)*. Вип. 60. Київ: НДІБК, 2004. С. 83—88.
- Johnson, C. E., Bittenbinder, A., Bogaert, B., Dietz, L., & Kohler, W. (1995). Earthworm: A flexible approach to seismic network processing. *IRIS Newsletter*, 14(2), 1—4
- Hart, D. M., & Young, C. J. (2004). *MatSeis User Manual version 1.9*. https://www.nemre.nnsa.doe.gov/prod/nemre/fileshare/matseis_manual.pdf.
- Sleeman, R., & van Eck, T. (1999). Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings. *Physics of the earth and planetary interiors*, 113(1-4), 265—275. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(99\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(99)00007-2).

Automated subsystem for processing and analyzing seismic data from the Carpathian region

S. T. Verbytskyi, Yu. T. Verbytskyi, O. T. Stetskiv, I. M. Nischimenko, 2019

It is presented the description of a system of seismic observations of the Carpathian region, the scheme of work of the center of collecting and processing of seismic information, the concept of regional base of seismological data of the Carpathian region. The principles of use of a control system of the database as the main instrument of preservation and manipulation of seismological information are shown. Development and deployment of a number of software which significantly improve process of input, editing, the analysis, graphical and documentary representation of seismological information is described. Work of a subsystem of processing and the analysis of data of the center of processing and storage of seismological data of a system of seismic observations of the Carpathian region is considered. Work of an automatic discernment of seismic events on the basis of the developed module of the program associator "SEISMIC ASSOCIATOR" is shown. Are described the interface of the developed software package on processing and the analysis of seismic data and its modules. The developed means of the visual analysis and correction of parameters of a seismic event are presented. The possibility of obtaining reporting documentation which allows to create seismological bulletins for the chosen time term of observations and also creation of the card of arrangement of epicenters of the seismic

events selected according to particular criteria and displays of the received results by means of service "Google maps" is realized. The possibility of comparison of epicenters of seismic events to arrangement of local the geological faults is realized. It is shown as the automated subsystem of processing and the analysis of network of seismic observations of the Carpathian region of processing allows to carry out the complex analysis of seismological information and also in process of accumulation of data gives the chance more precisely to estimate regional regularities, to specify local hodographs of seismic waves, to find out power dependences in the explored region.

Key words: data processing, Earthworm, seismic event organizer, seismic database.

References

- Aslambekova, I. P., Inchin, A. S., Kim, E. F., Kurbangaliev, N. M., & Pogoreltseva, I. V. (1995). Implementation of Integrated Data Processing in Seismic Monitoring: *Abstracts of the jubilee scientific conference dedicated to the 50th anniversary of the development of mathematics at the Academy of Sciences of Kazakhstan* (P. 34). Almaty (in Russian).
- Verbitskiy, S. T., Stetskiy, A. T., Verbitskiy, Yu. T., Rozhok, N. I., Stasyuk, A. F., & Pronishin, R. S. (2009). A system of collecting, processing and analysis of seismic data for Carpathian region. *Geofizicheskiy zhurnal*, 31(1), 125—132 (in Russian).
- Garshin, I. G. (2000). Practice of working with Oracle: generation, administration, replication. Moscow: Publishing LLC «Firm POLTEX», 250 p. (in Russian).
- Gordeev, E. I., Chebrov, V. N., Droznin, D. V., Kozyreva, N. P., Levin, V. I., Sergeev, V. A., Senyukov, S. L., & Yashchyuk, V. V. (2004). Collection, processing and storage of seismological information. In *Complex seismological and geophysical studies of Kamchatka* (pp. 43—61). Petropavlovsk-Kamchatsky: Ed. Kamchatka Branch of the Geophysical Survey RAS (in Russian).
- Inchin, A. S. (2002). Mathematical and methodical aspects of the complex analysis of observational data in seismic hazard assessment. In *Space research in Kazakhstan* (pp. 373—382). Almaty: ROND (in Russian).
- Kendzera, O. V., Verbitsky, S. T., Stasyuk, A. F., Verbitsky, Yu. T., & Oleshchuk, E. I. (2004). Improvement of the system for collecting seismological information in the Carpathian region. In *Interdepartmental Scientific and Technical Collection of Scientific Works (construction)* (Is. 60, pp. 83—88). Kyiv: Publ. of the State Enterprise «State Research Institute of Building Structures» (in Ukrainian).
- Johnson, C. E., Bittenbinder, A., Bogaert, B., Dietz, L., & Kohler, W. (1995). Earthworm: A flexible approach to seismic network processing. *IRIS Newsletter*, 14(2), 1—4.
- Hart, D. M., & Young, C. J. (2004). *MatSeis User Manual version 1.9*. https://www.nemre.nnsa.doe.gov/prod/nemre/fileshare/matseis_manual.pdf.
- Sleeman, R., & van Eck, T. (1999). Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings. *Physics of the earth and planetary interiors*, 113(1-4), 265—275. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(99\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(99)00007-2).