

УДК 550.34:551.242:528.34

Ермаков Д. Н.

*Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке,
г. Бишкек, Кыргызстан*

МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ГНСС-ПРИЁМНИКОВ В СЕЙСМОЛОГИИ

Аннотация. В обзорной статье рассмотрены методы использования высокоскоростных ГНСС-приёмников (1-50 Гц) в сейсмологии и геодинатике сейсмоактивных регионов. Показано, что комплексное использование сейсмометров и ГНСС-приёмников может дополнить данные, полученные при регистрации сильных землетрясений. Приведены примеры Учтурфанского (2024), Измитского (1999), Норчи (2016), Непальского (2015), Ильяпельского (2015) землетрясений и индуцированной сейсмичности в Польше. Обсуждены методы обработки RTDD, KPPP, TDCP и вариометрический подход, а также комплексное использование систем позиционирования (GPS+ГЛОНАСС, Galileo+GPS, GPS+BeiDou), снижающие шум и повышающие точность координат. Показаны перспективы использования машинного обучения и низкобюджетных автономных станций. Также отмечены ограничения метода из-за малой плотности сети наблюдений, порога магнитуды (>5 Mw), задержка регистрации Р-волн.

Ключевые слова: высокоскоростные ГНСС, сейсмология, сейсмические волны, мульти-ГНСС, раннее предупреждение, машинное обучение.

СЕЙСМОЛОГИЯДА ЖОГУРКУ ЫЛДАМДЫКТАГЫ ГНСС-КАБЫЛДАГЫЧТАРДЫ КОЛДОНУУ ЫКМАЛАРЫ

Кыскача мазмуну. Обзордук макалада сейсмологияда жана сейсмоактивдүү региондордун геодинатикасында жогорку ылдамдыктагы ГНСС-кабылдагычтарды (1–50 Гц) колдонуу ыкмалары каралды. ГНСС-кабылдагычтарды жана сейсмометрлерди комплекстүү колдонуу күчтүү жер титирөөлөрдө алынган маалыматтарды толуктай алары көрсөтүлдү. Учтурфан (2024), Измит (1999), Норчи (2016), Непал (2015), Ильяпель (2015) жер титирөөлөрү жана Польшадагы индукцияланган сейсмикалык активдүүлүк мисалдары келтирилди. RTDD, KPPP, TDCP иштетүү ыкмалары жана вариометриялык мамиле, ошондой эле позициялоо системаларын комплекстүү колдонуу (GPS+ГЛОНАСС, Galileo+GPS, GPS+BeiDou) талкууланды; алар ызы-чууну азайтып, координаттардын тактыгын жогорулатат. Машиналык окутууну жана аз бюджеттүү автономдуу станцияларды колдонуунун келечеги көрсөтүлдү. Ошондой эле байкоо тармагынын аз тыгыздыгы, магнитуда босогосу (>5 Mw), Р-толкундарын каттоонун кечигүүсү себебинен ыкманын чектөөлөрү белгиленди.

Негизги сөздөр: жогорку ылдамдыктагы ГНСС, сейсмология, сейсмикалык толкундар, мульти-ГНСС, эрте эскертүү, машиналык окутуу.

METHODS OF USING HIGH-RATE GNSS RECEIVERS IN SEISMOLOGY

Abstract. The review article examines methods of using high-rate GNSS receivers (1–50 Hz) in seismology and geodynamics of seismically active regions. It was shown that the integrated use of GNSS receivers and seismometers can extent database obtained during strong earthquakes. Examples are given for the Uqturpan (2024), Izmit (1999), Norcia (2016), Nepal (2015), and Illapel (2015) earthquakes and induced seismicity in Poland. Processing methods RTDD, KPPP, TDCP and the variometric approach are discussed, as well as the integrated use of positioning systems (GPS+GLONASS, Galileo+GPS, GPS+BeiDou), which reduce noise and increase coordinate accuracy. Prospects for the use of machine learning and low-cost autonomous stations

are shown. Limitations of the method are also noted due to the low density of the observation network, magnitude threshold (>5 Mw), and delay in recording P-waves.

Keywords: high-rate GNSS, seismology, seismic waves, multi-GNSS, early warning, machine learning.

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) превратились из инструмента геодезического позиционирования в один из ключевых методов геофизических исследований [1]. Благодаря высокой точности и возможности непрерывного мониторинга, ГНСС-наблюдения стали незаменимым источником данных для изучения широкого спектра геодинамических процессов - от медленных деформаций тектонических плит до быстрых смещений, вызванных сейсмическими событиями.

На протяжении многих лет доминируют данные с 30-секундным интервалом дискретизации [2]. Такие измерения оказались эффективны для регистрации медленных тектонических движений, постсейсмических релаксационных процессов и накопления деформации на границах плит. Однако их временное разрешение ограничивает возможность анализа динамики быстропротекающих процессов.

Развитие технологий высокочастотных ГНСС-приёмников (с частотой 1-50 Гц) открыло новые возможности в сейсмологии. Эти системы позволяют регистрировать смещение грунта в зоне влияния сильных землетрясений, не уходить в насыщение при больших амплитудах, в отличие от традиционных сейсмометров, напрямую измерять абсолютное смещение, а не ускорения или скорости [3]. Это важно для изучения механизмов очагов, моделирования распространения сейсмических волн, а также для улучшения систем раннего предупреждения [4].

В данной работе проведён обзор методов использования высокоскоростных ГНСС-приёмников в сейсмологии и изучении геодинамики сейсмоактивных регионов.

Несмотря на использование надёжных трёхкомпонентных широкополосных сейсмометров STS-2, при сильных землетрясениях вблизи от сейсмических датчиков может наблюдаться насыщение сигнала. На примере Учтурфанского землетрясения, произошедшего 22 января 2024 года с Mw 7 [5], на сейсмограммах (рисунок 1, 2) можно видеть обрезание экстремальных уровней сигнала на станциях с разным удалением от эпицентра.

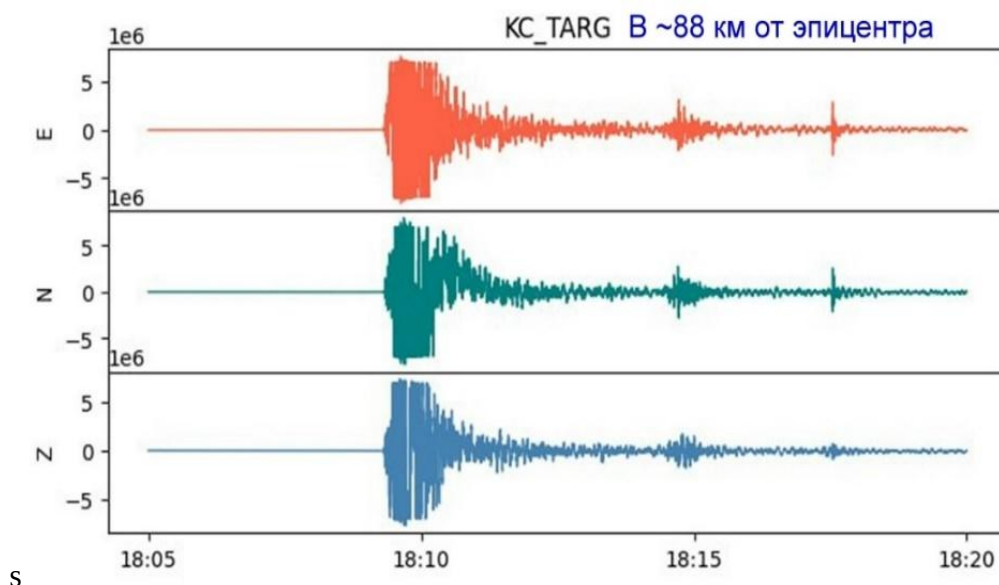


Рисунок 1. Сейсмограмма со станции «Тарагай» (KC.TARG) на расстоянии 88 км от эпицентра.

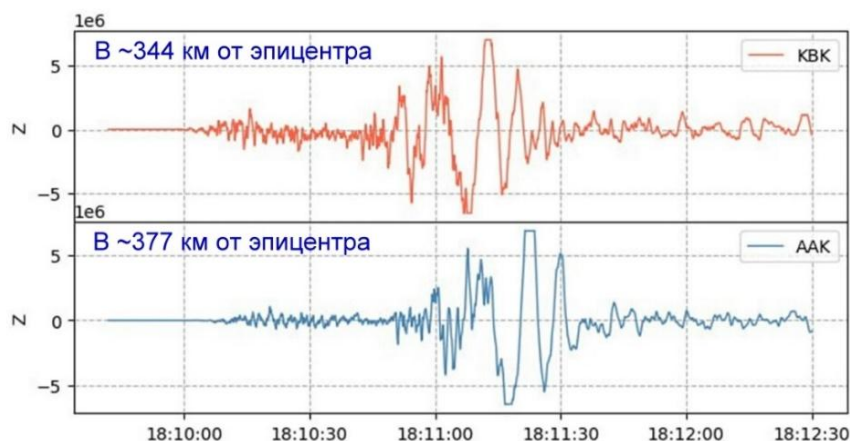


Рисунок 2. Сейсмограммы со станций «Карагай-Булак» (KN.KBK) и «Ала-Арча» (KN.AAK) на расстояниях 344 и 377 км от эпицентра.

В таких случаях характер проявления и параметры самых разрушительных поверхностных волн (L – Лява, R – Рэлея) фиксируются не в полной мере, поэтому использование ГНСС-данных позволяет фиксировать уровень смещений без ограничения и дополнять базу сейсмологических данных. Однако для детектирования прихода ко-сейсмических волн ГНСС-приёмнику необходима высокая частота опроса, например, 1 Гц и выше.

Для моделирования условий процесса землетрясения Mw 7.4 в Измите (Турция) 17.08.1999 г. был проведён эксперимент с использованием одноосного линейного вибростенда GSK-166 для моделирования записи вертикального ускорения поверхности с частотой 200 Гц. В ~20 км от эпицентра расположена станция Яримка (YPT), 2-х минутные записи сейсмического события которой были проанализированы [6]. Авторы показывают, что ГНСС-приёмник на вибростенде способен фиксировать большинство типов волн - P, S, L и R. Для исследования влияния частоты дискретизации на регистрацию сейсмических волн по ГНСС-данным одновременно применялись два режима частоты 1 и 50 Гц. На рисунке 3 видно, что ГНСС-данные, обработанные двумя методами RTDD (Real-Time Double Difference) и KPPP (Kinematic Precise Point Positioning), дают более полное отображение L и R волн. Эта работа носит методический характер и закладывает основу для возможности использования в системах раннего предупреждения землетрясений.

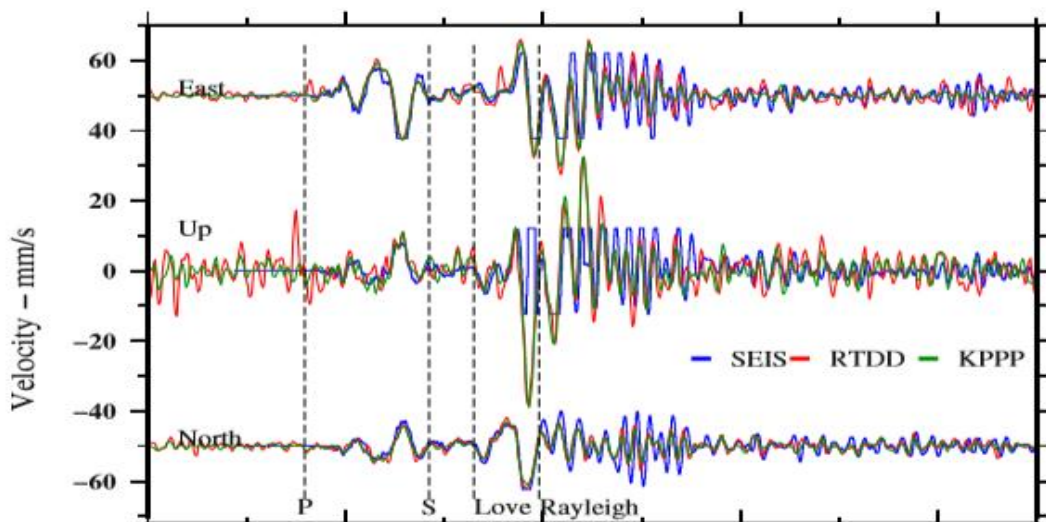


Рисунок 3. Сравнение временных рядов скоростей смещения, полученные методами RTDD (красный цвет) и KPPP (зелёный цвет), и записи сейсмографа (синий цвет) [6].

Ещё одним применением ГНСС-данных в сейсмологии является использование автономных ГНСС-приёмников в качестве альтернативы сейсмометрам для мониторинга в реальном времени и обнаружения землетрясений [7]. Основная идея заключается в том, что по временным производным фазовых измерений ГНСС можно с высокой точностью (несколько мм/с, а в мульти-ГНСС - до десятых долей мм/с) оценивать скорость прихода сейсмической волны. Для обнаружения фазы применяется статистический тест отношения сигнал/шум (критерий χ^2) с накоплением по нескольким эпохам, что позволяет достаточно надёжно фиксировать начало вступления.

В качестве примера рассматривается землетрясение 30 октября 2016 года с Mw 6.5 вблизи Норчи (Центральная Италия). Обработаны данные 42 ГНСС-приёмников с частотой 1 и 2 Гц на эпицентральных расстояниях от 10 до 170 км. Обнаруженные первые вступления (Р-волны) сравниваются с данными приборов сильных движений (strong motion (SM)) из сети ORFEUS (Observatories and Research Facilities for European Seismology) (рисунок 4).

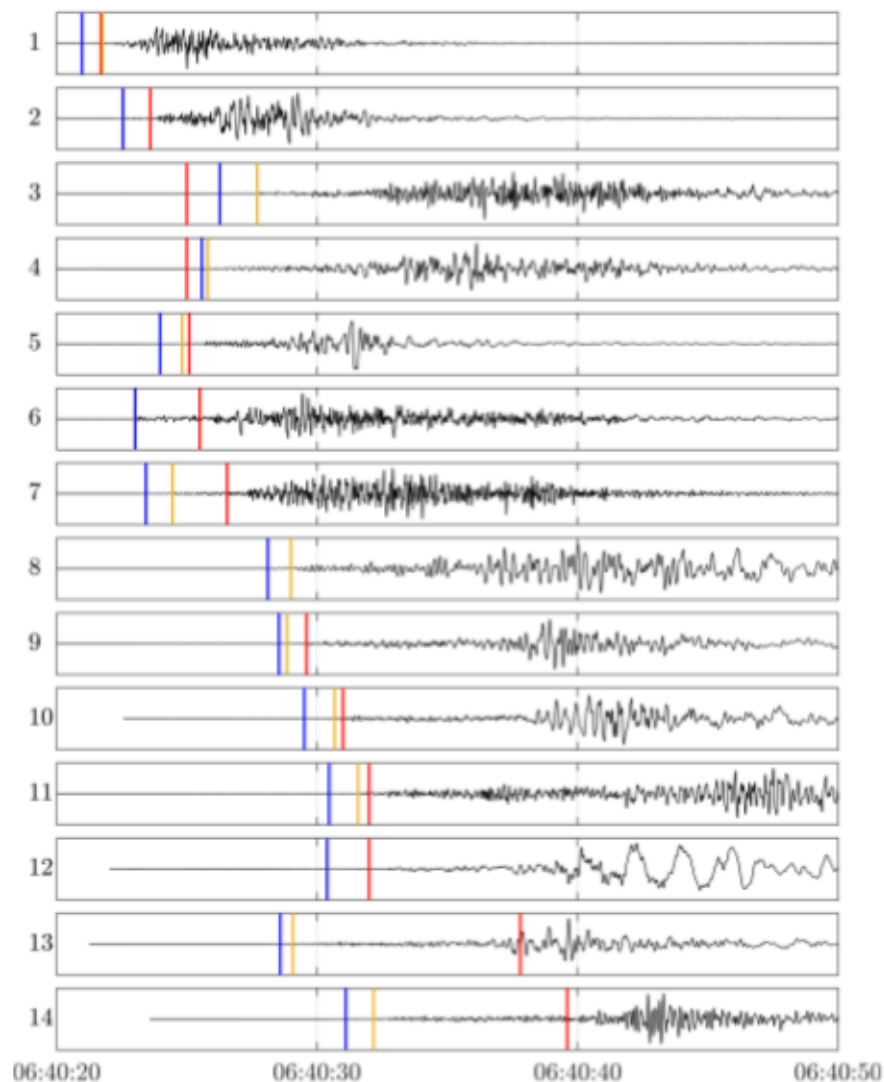


Рисунок 4. Вертикальными линиями отмечены зафиксированные моменты первых вступлений: красным цветом - для ГНСС, жёлтые - для SM (автоматическое определение), синим - для SM (ручное определение) [7].

Из рисунка видно, что ГНСС фиксирует Р-волны с небольшой задержкой (в среднем 0.4 - 1.1 с) относительно приборов сильных движений, что объясняется меньшей чувствительностью ГНСС. Тем не менее, первые вступления уверенно идентифицируются

как Р-волна, и по ним оцениваются кажущиеся скорости волн (около 5000 м/с для Р и 3040 м/с для S-волны) (рисунок 5).

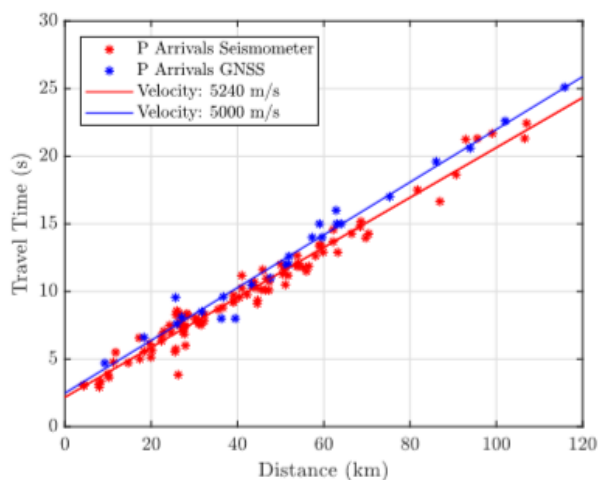


Рисунок 5. Время прохождения и скорости прихода Р-волн, полученные соответственно для станций ГНСС и сейсмометров. Наблюдается тенденция к регистрации приходов по данным ГНСС с небольшой задержкой по сравнению с первыми приходами, зафиксированными сейсмометрами [7].

На основе времён приходов, определённых только по ГНСС, выполняется локализация гипоцентра с использованием простой 3D-модели пересечения сфер с неизвестными координатами гипоцентра и временем в очаге. Решение уточняется последовательным добавлением станций. Итоговые оценки гипоцентра отличаются от официальных решений INGV (Национальный институт геофизики и вулканологии Италии, итал. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) менее чем на 1 км (по компонентам Восток, Север, Глубина). Оценка времени в очаге имеет смещение около 1.4 с, что связано с задержкой обнаружения Р-волн.

В статье отмечается, что использование ГНСС-приёмника в качестве аналога сейсмометра может обеспечить автономное решение для мониторинга тектонических опасных явлений и дополнить системы раннего предупреждения о землетрясениях. Обсуждаются ограничения: необходима достаточная плотность ГНСС-станций, магнитуда землетрясения должна быть достаточно высокой (для надёжного обнаружения >5 Mw при плотной сети, >6 Mw в менее благоприятных условиях), а также требуется 5-10 последовательных эпох для уверенного детектирования.

Перспективными являются мульти-ГНСС эксперименты, позволяющие обнаруживать сигналы на уровне долей мм/с. Например, успешное применение GPS+BeiDou (BDS) с использованием вариометрического подхода для определения сейсмических волн было продемонстрировано на примере землетрясения в Непале 25 апреля 2015 года с Mw 7.8 [8]. Вариометрический подход позволяет обходить сложности, связанные с неоднозначностью волн, и работать в режиме, близкому к реальному времени. Именно эта работа открыла целое направление мульти-ГНСС сейсмогеодезии. Дальнейшие эксперименты по использованию мульти-ГНСС показали равномерное снижение шума по всей полосе частот, особенно для северной компоненты - до 40%, и на 10–30% для восточной и вертикальной при использовании GPS+ГЛОНАСС [9].

Авторы обработали 31 день 1-Гц данных GPS+ГЛОНАСС на 99 станциях в Европе. Дополнительно были использованы данные двух землетрясений: 12 мая 2015 г., Непал, Mw 7.3; 16 сентября 2015 г., Ильяпель (Чили), Mw 8.3. Обработка была выполнена в режиме PPP с фиксированием неоднозначностей отдельно для GPS и ГЛОНАСС. Смещения на каждой станции вычислялись относительно суточных оценок координат. На рисунке 6

показаны смещения по северной компоненте на четырёх станциях: TIBT, TOLO, RCSD, MRCG – для двух землетрясений. Сравнивались GPS, GPS с сидерической фильтрацией и GPS+ГЛОНАСС.

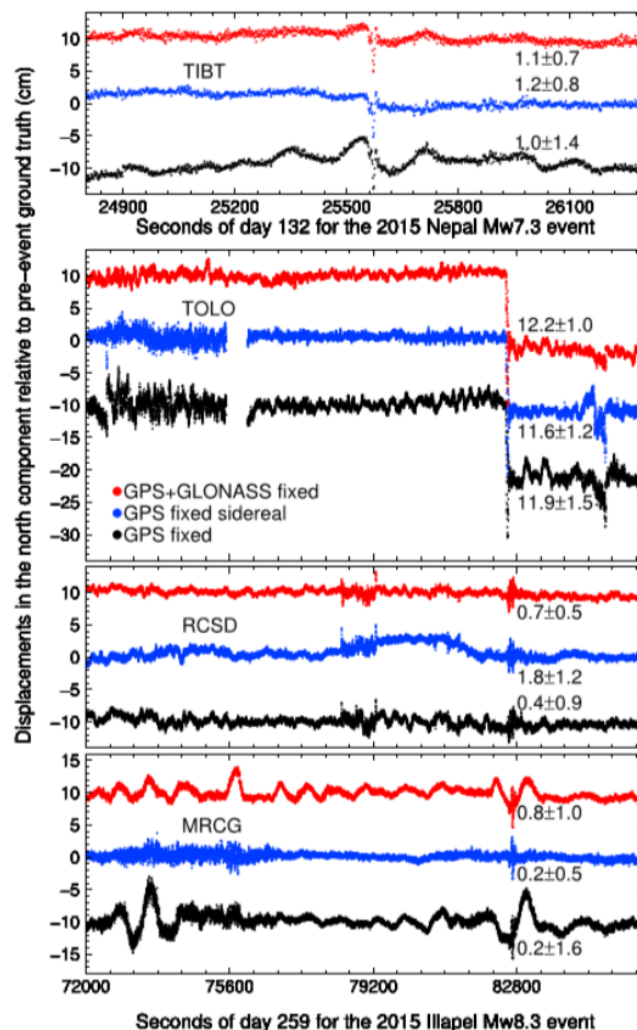


Рисунок 6. На графиках показаны смещения (в см) с частотой 1 Гц по северной компоненте на четырёх станциях (TIBT, TOLO, RCSD и MRCG) во время двух сильных землетрясений 2015 года: события в Непале 12 мая с Mw 7.3 (первая панель) и события в Ильяпеле 16 сентября с Mw 8.3 (вторая и третья панели) [9].

Кроме сочетаний GPS+BeiDou и GPS+ГЛОНАСС, в работах также представлена система GRaSS (Galileo For Seismography System) для автоматической обработки высокочастотных наблюдений Galileo+GPS с целью мониторинга сейсмических событий, вызванных горными работами в юго-западной Польше [10]. Длина базовых линий - до 34 км, частота - 50 Гц

Валидация проведена двумя способами:

1. По реальному событию, произошедшему 29 января 2019 года с Mw 3.8, вызванного горными работами. Сравнение с акселерометрами показало хорошее согласие в частотной области; ГНСС-амплитуды смещений оказались до 2 раз выше, что объясняется разным расположением антенн и акселерометров.
2. По эксперименту на одноосном вибростенде. Смоделированы колебания с частотами 2.5 и 4.5 Гц и амплитудами 10.3; 4.9 и 1.4 мм. Система GRaSS и PPP уверенно определили частоты; ошибки по амплитуде для GRaSS составили 0.2-1.9 мм, для PPP - в основном 0.5-2.7 мм.

Кроме мульти-ГНСС подхода в последнее время актуальным является использование искусственного интеллекта (ИИ). Это направление открывает путь к полностью автоматизированным системам раннего предупреждения, работающим без пороговых эвристик и человеческого вмешательства.

Применение машинного обучения к временным рядам ГНСС, полученных методом TDCP (time-differenced carrier phase), можно рассмотреть на примере работы [11]. Авторы собрали 1701 пару «станция–событие» по 77 землетрясениям с M_w 4.8–8.2 за ~20 лет, добавили 1507 шумовых рядов — это одна из наиболее крупных и репрезентативных выборок на территории исследования. Модель обеспечила 90% истинных обнаружений при задержке в несколько секунд после S-волны и 98% для событий с $M_w > 6.0$ в радиусе <100 км. Классификационный алгоритм машинного обучения превосходит существующие методы детектирования сейсмических сигналов по высокочастотным ГНСС-данным (5 Гц).

Здесь необходимо отметить, что для обучения моделей ИИ необходима большая обучающая выборка и соответственно, для этого нужны улучшения пространственного покрытия постоянных сетей ГНСС и обеспечения непрерывности наблюдений во времени. Основные проблемы при этом связаны со значительными затратами из-за высокой стоимости высококласных ГНСС-приёмников и антенн, а также логистики, необходимой для установки и регулярного обслуживания [12].

В качестве примера решения этой задачи можно рассмотреть прототип низкобюджетной открытой мульти-ГНСС станции, включающей двухчастотный ГНСС-чип, калиброванную антенну, Raspberry Pi и 4G-модем для передачи данных [12]. Система проста в развертывании и обеспечивает точное позиционирование как в реальном времени, так и в пост-обработке. Оценка производительности по качеству исходных данных и временным рядам (высокочастотным и среднесуточным) за год непрерывных наблюдений показала качество, эквивалентное высококласному геодезическому оборудованию и превосходящее другие низкобюджетные системы. При этом в работе продемонстрировано, что стоимость больше не является барьером для более плотных геодинамических сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый обзор показывает, что высокоскоростные ГНСС-приёмники с частотой 1-50 Гц стали чаще использоваться для ко-сейсмических измерений и могут расширить диапазон параметров для изучения землетрясений. ГНСС-измерения способны отслеживать параметры сильных движений земной коры в полном объёме, обеспечивают прямое измерение абсолютных смещений и, в особых случаях, позволяют регистрировать широкий спектр сейсмических волн – P, S, L и R. Это делает их ценными при изучении сильных землетрясений, оценке магнитуды и построении систем раннего предупреждения.

На ряде примеров сильных землетрясений показано, что ГНСС-данные, обработанные методами RTDD, KPPP, TDCP и вариометрическим подходом, хорошо согласуются с записями сейсмометров. При этом использование мульти-ГНСС данных (GPS+ГЛОНАСС, Galileo+GPS, GPS+BeiDou) обеспечивает снижение шума, повышение точности и надёжности регистрации координат.

Перспективным направлением является применение машинного обучения и создание низкобюджетных автономных станций, что открывает путь к плотным геодинамическим сетям и полностью автоматизированным системам мониторинга. Вместе с тем имеются трудности: необходима достаточно высокая частота опроса, плотность станций, магнитуда события выше определённого порога, а также учёт задержки регистрации P-волн относительно сейсмометров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Steblov, G. M., Shebalin, P. N., Melnik, G. E. Precise Satellite Geodetic Measurements and Geodynamic Research in Northern Eurasia: State and Prospects // Doklady Earth Sciences. 2024. Vol. 518, pt. 1. P. 1577–1584. DOI: 10.1134/S1028334X24602487.
2. Munetaka H. A prototype system for PPP kinematic positioning of Japanese GEONET stations // Journal of the Geospatial Information Authority of Japan. 2017. No. 129. P. 1–19. DOI: 10.57499/JOURNAL_129_1.
3. Larson K. M. GPS seismology // Journal of Geodesy. 2009. Vol. 83, no. 3–4. P. 227–233. DOI: 10.1007/s00190-008-0233-x.
4. Lin M., Li Q., et al. High-rate GNSS-based rapid determination of coseismic deformation and source characteristics for the 2023 M6.2 Jishishan earthquake // Earthquake Science. 2025. Vol. 38, no. 3. DOI: 10.1016/j.eqs.2025.01.002.
5. Имашев С. А., Кузиков С. И. Аномальные вариации полного электронного содержания ионосферы и геодинамические условия для Учтурфанского землетрясения 22.01.2024 магнитудой 7 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 4. С. 87–98. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-87-98.
6. Nie Z., Yang Y., Jia Y. GNSS seismometer: Seismic phase recognition of real-time high-rate GNSS deformation waves // Journal of Applied Geophysics. 2016. Vol. 130. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.04.006.
7. Hohensinn R., Geiger A. Stand-Alone GNSS Sensors as Velocity Seismometers: Real-Time Monitoring and Earthquake Detection // Sensors. 2018. Vol. 18, no. 11. 3712. DOI: 10.3390/s18113712.
8. Geng J., Pan Y., Li X. Real-time capture of seismic waves using high-rate multi-GNSS observations: Application to the 2015 Mw 7.8 Nepal earthquake // Geophysical Research Letters. 2016. Vol. 43, no. 1. P. 161–167. DOI: 10.1002/2015GL067044.
9. Geng J., Pan Y., Li X. Integrating GPS with GLONASS for high-rate seismogeodesy // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, no. 7. P. 3139–3146. DOI: 10.1002/2017GL072808.
10. Paziewski J., Stepniak K., Sieradzki R. Towards Galileo + GPS seismology: Validation of high-rate GNSS-based system for seismic events characterisation // Measurement. 2020. Vol. 164. 108088. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108088.
11. Dittmann T., Hodgkinson K., Morton J. Supervised Machine Learning of High Rate GNSS Velocities for Earthquake Strong Motion Signals // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2022. Vol. 127. e2022JB024854. DOI: 10.1029/2022JB024854.
12. Vidal M. Cost-Efficient Multi-GNSS Station with Real-Time Transmission for Geodynamics Applications // Remote Sensing. 2024. Vol. 16, no. 6. 991. DOI: 10.3390/rs16060991.

Рецензент: к. ф.-м.н. Имашев С.А.