

УДК 550.34

Состояние и перспективы детальной обработки землетрясений Прибайкалья и Забайкалья

© 2023 г. Н.А. Гилёва, М.А. Хритова

БФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 15.02.2023 г.

Аннотация. На протяжении всей истории Байкальской сейсмической сети (с 1901 г.) прилагались все усилия для сохранения максимально подробной информации о регистрируемых сейсмических событиях. В работе описана методика детальной сводной обработки землетрясений Прибайкалья и Забайкалья, используемая в Байкальском филиале (БФ) ФИЦ ЕГС РАН. На примере 2019 г. показаны уровень и качество региональной обработки. За год зарегистрировано 7273 землетрясения, большинство из них (62%) являются слабыми ($K_p=6$), для которых ошибка определения координат эпицентров в среднем составила менее 5 км. Для землетрясений с $K_p \geq 9$ точность локализации эпицентров – менее 2 км. Представлены некоторые результаты исследований с использованием данных Култукской и Муяканской локальных временных сетей. Приведено сравнение результатов и объёмов обработки землетрясений с другими филиалами ФИЦ ЕГС РАН. Так, за период (2014–2017 гг.) по числу землетрясений регион Прибайкалья и Забайкалья ($N=63081$) превосходит любой из остальных сейсмически активных регионов России как минимум в 2.4 раза (Алтай и Саяны – $N=26458$; Камчатка и Командорские острова – $N=26301$). По числу сейсмических станций, данные которых используются при обработке одного землетрясения ($K \geq 9$), и числу фаз сейсмических волн лидируют и близки между собой регион Прибайкалья, Забайкалья и Северный Кавказ: станций 29 и 33 соответственно; фаз 87 и 68. То есть объём обработки землетрясений в Байкальском филиале значительно больше, чем в любом из филиалов ФИЦ ЕГС РАН. Сделан вывод, что в настоящее время, с учётом размеров региона, количества сейсмических станций, качества связи и числа регистрируемых землетрясений, их обработка в БФ ФИЦ ЕГС РАН осуществляется оптимальным образом. Реформирование системы обработки сейсмических событий в БФ ФИЦ ЕГС РАН целесообразно после значительного увеличения пунктов наблюдения в регионе.

Ключевые слова: землетрясение, каталог, бюллетень, детальная обработка, Прибайкалье, Забайкалье, Байкальская рифтовая зона.

Для цитирования: Гилёва Н.А., Хритова М.А. Состояние и перспективы детальной обработки землетрясений Прибайкалья и Забайкалья // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 77–99. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.06>. – EDN: SSNWGI

Введение

Обширная зона Прибайкалья и Забайкалья площадью около 2 млн. км² включает Иркутскую область, Республику Бурятия и Забайкальский край. На данной территории находится крупнейшая внутриконтинентальная Байкальская рифтовая зона (БРЗ), имеющая протяжённость 1600 км и характеризующаяся высокой тектонической и сейсмической активностью (рис. 1), в её пределах происходит подавляющее большинство землетрясений региона (~95%).

Традиционно (Байкальской сети в 2023 г. исполняется 122 года) в регионе обрабатывались все зарегистрированные землетрясения.

Отметим, что эта традиция восходит к моменту открытия сейсмической станции «Иркутск» 1 декабря 1901 года. С этого времени списки всех зарегистрированных землетрясений, как местных, так и удалённых, публиковались в Иркутске в виде отдельного издания [*Вознесенский*, 1902]; затем полученные материалы наблюдений размещались в специализированном «Бюллетене Постоянной Центральной сейсмической комиссии» [*Бюллетень ...*, 1903]. Таким образом, на протяжении всей истории Байкальской сейсмической сети прилагались все усилия для сохранения максимально подробной информации о регистрируемых сейсмических событиях.

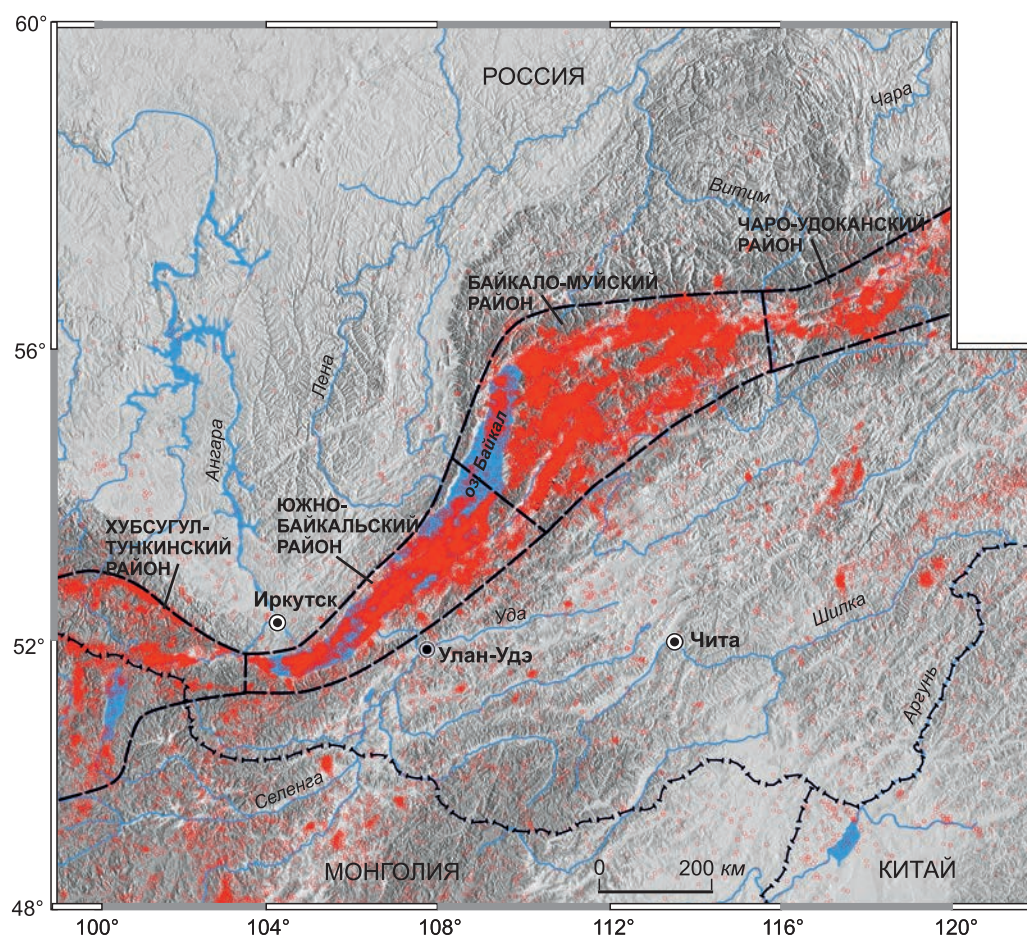


Рис. 1. Карта эпицентров (красные точки) землетрясений с $K_p > 6.5$ ($N=78943$), параметры которых содержатся в базе данных сейсмологических наблюдений территории Прибайкалья и Забайкалья (1994–2019 гг.) [Гилёва, 2014; 2015; 2017; 2018].

Границы условных сейсмических районов [Мельникова и др., 2003]
Байкальской рифтовой зоны очерчены пунктирной линией

В настоящее время мониторинг сейсмичности в Прибайкалье и Забайкалье на протяжении многих лет осуществляется Байкальским филиалом (БФ) ФИЦ ЕГС РАН. С этой целью производится срочная сводная обработка сильных ($K_p \geq 11$) землетрясений, составляющих менее 1% всех регистрируемых сейсмических событий региона. Эти данные незамедлительно передаются службам МЧС России. Далее все зарегистрированные землетрясения территории (рис. 1) детально обрабатываются с использованием имеющихся материалов наблюдений.

За период цифровой регистрации (с 2002 г.) в зоне ответственности БФ фиксируется порядка 7–10 тыс. землетрясений $K_p \geq 6$ в год. В отдельные годы наблюдается значительный рост числа событий. К примеру, в 2015 г. в Северо-Муйском районе БРЗ была зарегистрирована самая многочисленная (более 30 тыс. событий с $K_p \geq 3$) за весь период инструментальных наблюдений

в регионе Муяканская последовательность землетрясений [Мельникова и др., 2021; Melnikova et al., 2022], а в 2021 г. в районе оз. Хубсугул произошло сильное землетрясение (11.01.2021 г., $M_w=6.7$) [Emanov et al., 2022], сопровождавшееся десятками тысяч афтершоков.

Результаты обработки полученных материалов позволяют изучать пространственно-временную структуру сейсмичности и очаговые параметры землетрясений, которые дают новую информацию о внутреннем строении зон активных разломов и напряжённо-деформированном состоянии геосреды [Melnikova et al., 2012; 2022; Filippova et al., 2022]. В мировой практике подобным исследованиям уделяется большое внимание [Waldhauser, Schaff, 2008; Fojtková et al., 2010; Kocharyan et al., 2010; Shelly, 2020; Michele et al., 2020]. Очевидно, что детальный анализ результатов наблюдений за сейсмичностью Прибайкалья и Забайкалья играет ключевую роль в познании

природы землетрясений и предотвращении катастрофических последствий после сильных сейсмических событий. Полученная информация также имеет важное значение и для создания различных моделей геодинамического развития региона.

Необходимо отметить, что в Байкальском филиале, наряду с плановой и своевременной обработкой региональных землетрясений, время от времени отмечается их значительная задержка. Это связано с аномально высокими по количеству сейсмических событий годами, к примеру, 2015 и 2021 гг. С одной стороны, отставание в обработке сейсмических событий негативно сказывается на графике публикаций каталогов землетрясений Северной Евразии и их качестве, с другой стороны – заметно ослабляет возможности выполнения приоритетных сейсмологических исследований.

В данной работе представлена подробная методика детальной сводной обработки землетрясений Прибайкалья и Забайкалья, используемая в БФ ФИЦ ЕГС РАН, а также существующие

на сегодняшний день возможности и проблемные задачи, решение которых направлено на получение качественного сейсмологического материала.

Методика детальной сводной обработки землетрясений

Детальная сводная обработка землетрясений состоит из выполнения подготовительных процессов: (1) сбор непрерывных данных сейсмических станций региона и прилегающих территорий, (2) производство контроля качества материалов наблюдений, (3) пополнение архива в структурированном формате непрерывными сейсмическими записями; и основных функций: (4) распознавание региональных землетрясений и взрывов по непрерывным записям сейсмических станций, (5) создание подборок волновых форм выделенных сейсмических событий, (6) обработка сейсмических событий, (7) сохранение результатов обработки в базе данных сейсмологических наблюдений территории Прибайкалья и Забайкалья (рис. 2).

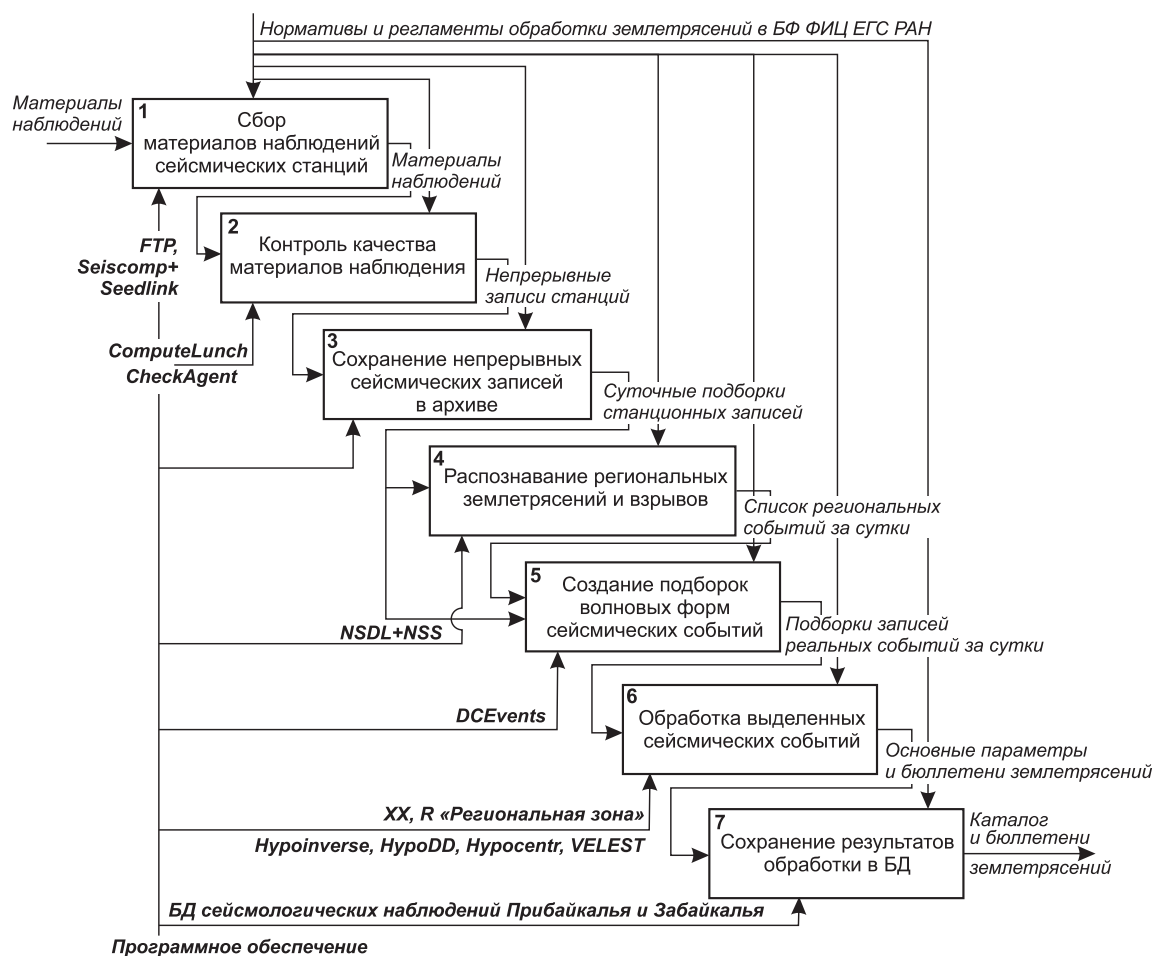


Рис. 2. Функциональная схема детальной сводной обработки землетрясений в БФ ФИЦ ЕГС РАН

Сбор данных

Для осуществления детальной сводной обработки всех землетрясений зоны Прибайкалья и Забайкалья собираются непрерывные данные сейсмических станций региона и прилегающих территорий (рис. 3).

В режиме, близком к реальному времени, в систему SeisComP3 [Documentation ..., 2023] передаются непрерывные данные в формате MiniSEED четырёх широкополосных приборов станций Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (ORL, MOY, ZAK, IRK), шести станций Алтае-Саянского филиала (ARDR, KZLR, KNGR, TDJR, MINR, ERNS), двух станций Якутского филиала (CLNS, YKLR), станции ZEA Сахалинского филиала, а также двух станций Монгольской сети (HTGB и SHBM*).

С 23 сейсмостанций Байкальского филиала осуществляется сбор непрерывных данных через FTP-сервер организации. Задержка получения материалов с этих станций составляет 1–3 дня. Непрерывные записи двух станций Байкальского филиала всё ещё доставляются в центр почтой России. Полные непрерывные данные десяти станций Бурятского филиала (БуФ) ФИЦ ЕГС РАН, а также двух станций

ИЗК СО РАН становятся доступны с задержкой до нескольких месяцев.

Из 26 станций БФ (рис. 3, <https://seis-bykl.ru/modules.php?name=Network>) на четырёх установлены по три комплекта трёхкомпонентной аппаратуры, на 19 станциях – по два комплекта [Кобелева и др., 2022]. 23 станции, кроме трёхкомпонентных велосиметров, оснащены трёхкомпонентными акселерометрами для регистрации сильных движений. Исходным форматом регистрации станций сети БФ преимущественно является формат Baikal с частотой дискретизации 100 отсч/с. Для удобства дальнейшей обработки данные из формата MiniSEED конвертируются в формат Baikal с помощью программы MseedToBaikal (разработана в БФ) и сохраняются в двух форматах.

Контроль качества материалов наблюдений

В центре сбора БФ осуществляется контроль качества материалов наблюдений: поиск и подсчёт перерывов в файлах непрерывных сейсмических записей, фиксация изменения координат и калибровочных коэффициентов сейсмометрических каналов (программа ComputeLunch); производится проверка корректности данных шестиканальных сейсмических записей

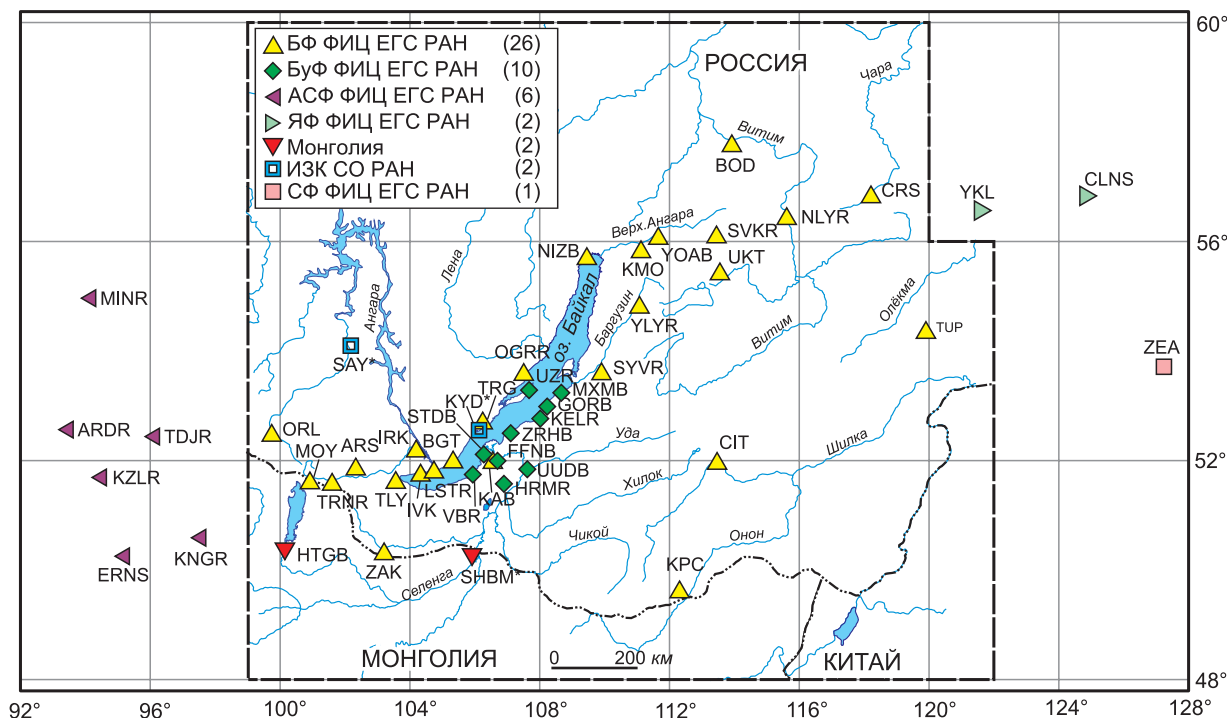


Рис. 3. Схема расположения сейсмических станций сейсмологических агентств, непрерывные данные которых используются при детальной сводной обработке землетрясений зоны Прибайкалья и Забайкалья.

Пунктиром очерчены границы зоны. В легенде в скобках приведено число станций по каждому агентству.

* – код станции не является международным

(NS, EW, Z, NSg, EWg, Zg) формата Baikal, основанная на попарном сравнении чувствительных (NS, EW, Z) и соответствующих им грубых (NSg, EWg, Zg) каналов после процедур интегрирования или дифференцирования (программа CheckAgent [Христова, Гилёва, 2013; Христова, 2017]) (рис. 4).

За пять последних лет (2018–2022 гг.) время непрерывной работы всех станций Байкальского филиала, при обязательном условии получения ими качественных материалов наблюдений, по отношению ко всему времени года в процентах обеспечено на уровне 96–98%.

Создание архива волновых форм

С помощью программного обеспечения формируются архивированные суточные подборки непрерывных записей по всем имеющимся постоянным и временным станциям (в настоящее время максимальное количество станций ~45–50) и сохраняются в архиве.

Для запроса данных из архива волновых форм цифровых станций Прибайкалья, Забайкалья и прилегающих территорий, данные в котором имеются с 2003 г., используется программа (разработана в БФ), позволяющая выполнять выборку по времени, конкретным станциям и разархивацию непрерывных записей (рис. 5).

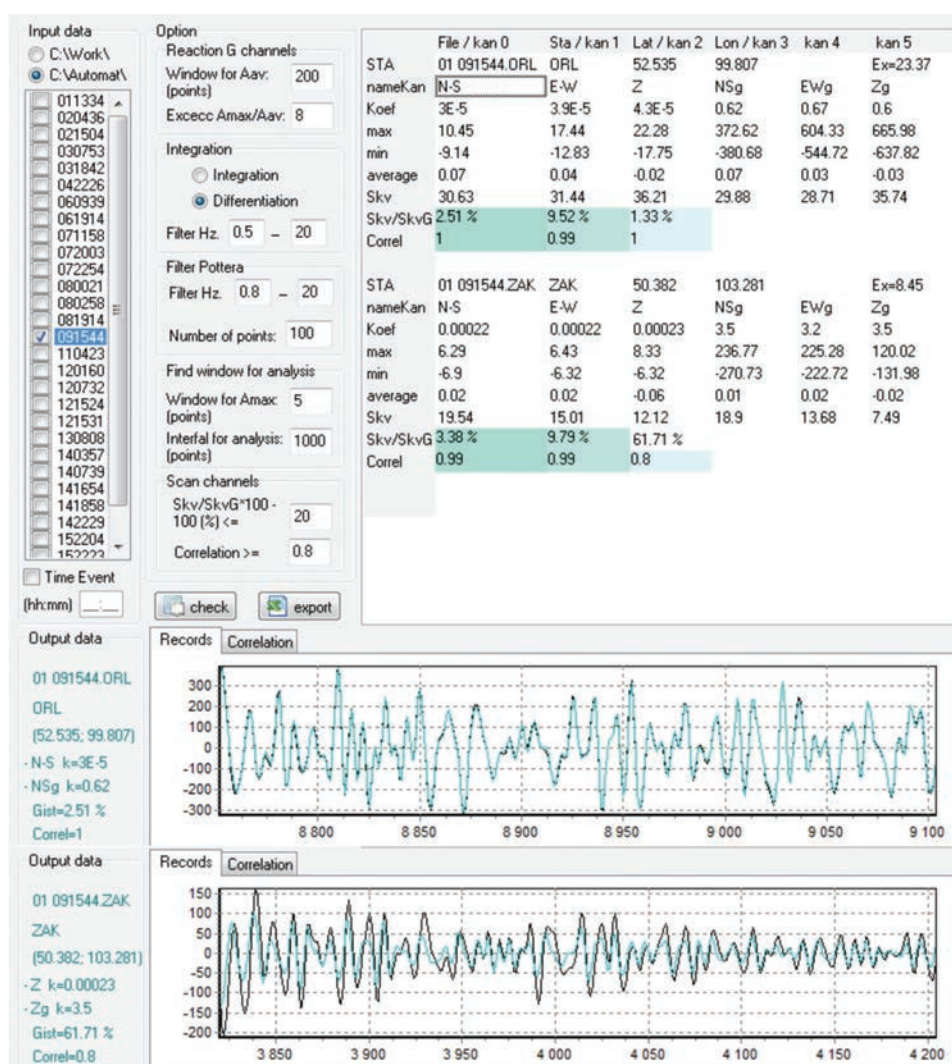


Рис. 4. Окно программы CheckAgent с результатами проверки качества работы каналов двух сейсмических станций при землетрясении 09.01.2023 г. в 15^h44^m55^s.

Удовлетворительная согласованность работы каналов скорости NS и ускорения NSg сейсмостанции ORL со среднеквадратическим отклонением, равным 2.51%, и коэффициентом корреляции – 1; неудовлетворительная согласованность работы каналов скорости Z и ускорения Zg сейсмостанции ZAK со среднеквадратическим отклонением, равным 61.71%, и коэффициентом корреляции – 0.8



Рис. 5. Окно программы запроса к архиву волновых форм

Распознавание событий

Для распознавания событий (начиная с 2016 г.) используется система NSDL [Асминг и др., 2017; 2018], а именно программа NSS, с помощью которой производится детектирование и лоцирование сейсмических событий по отдельным станциям. Первоначально для станций региона были созданы Байесовские классификаторы, т.е. наборы правил, позволяющие программе NSS отличать ложные срабатывания детектора от реальных сейсмических событий. Создание классификаторов – это довольно трудоёмкий и требующий времени процесс. Для создания качественных классификаторов необходимы сотни записей как реальных событий, так и ложных. В настоящее время распознавание (NSS) производится по непрерывным записям 25 сейсмостанций Байкальского и Бурятского филиалов, ещё на четырёх станциях БФ сохранилась станционная обработка, т.е. обнаружение землетрясений осуществляется сотрудниками сейсмостанций. В целом такое распознавание землетрясений двумя способами обеспечивает достаточный уровень представительности в регионе.

Создание подборок волновых форм сейсмических событий

Подготовленные исходные данные сети станций Прибайкалья, Забайкалья и прилегающих территорий с распознанными сейсмическими событиями предоставляются в Сектор сводной обработки, где обработка ведётся отдельными сотрудниками посуточно.

С применением программы DCEvents [Хритова, 2022] (рис. 6) по результатам распознавания создаются подборки фрагментов волновых форм для каждого сейсмического события для последующей детальной обработки.

Введённые результаты распознавания (NSS и станционная обработка) программа DCEvents группирует в события по времени и обозначает одним цветом в таблице (рис. 6), выделяя среднее время события (T_0), энергетический класс ($K_{\text{пер}}$), ближайшую станцию. Далее происходит копирование и разархивирование непрерывных суточных данных из архива. Для исключения из каталога ложно определённых событий и идентификации истинных реализована функция просмотра отдельной записи (рис. 7). Ложное событие в окне программы (рис. 6) удаляется

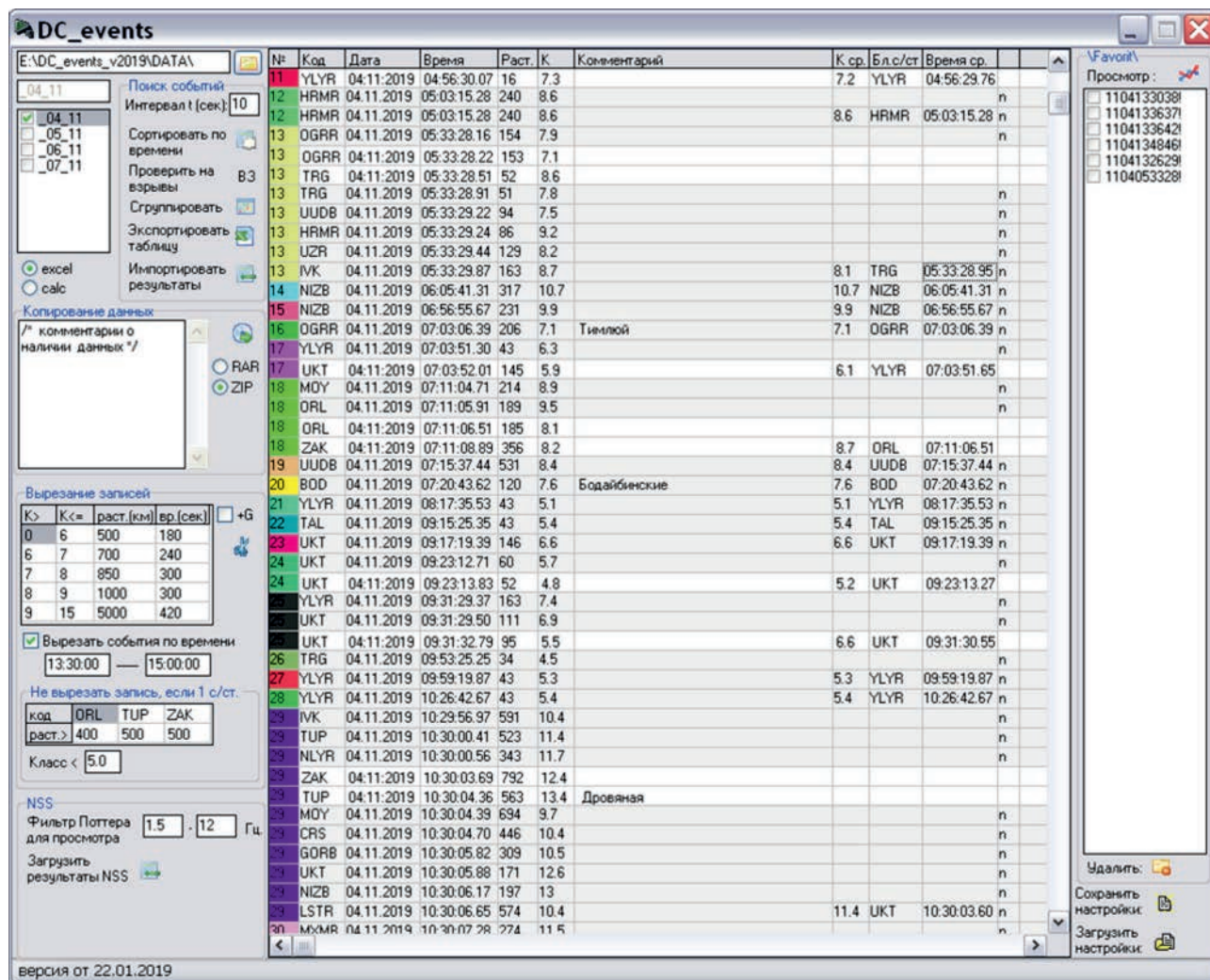


Рис. 6. Основное рабочее окно программы DCEvents после выделения событий

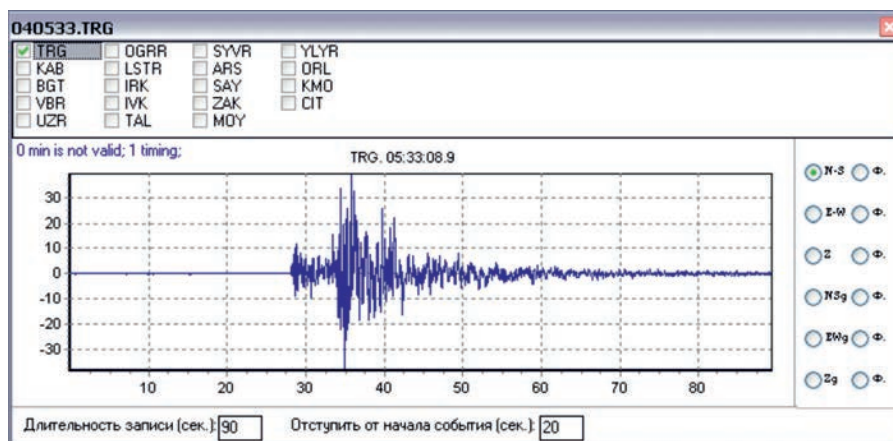


Рис. 7. Окно предварительного просмотра записей события в программе DCEvents

из претендентов на создание для него подборки фрагментов волновых форм. Наборы записей для оставшихся событий могут быть вырезаны сразу за сутки, за назначенный период времени или для одного события. Длительность

записи и число необходимых для обработки станций зависит от силы землетрясения, условия могут быть назначены и отредактированы пользователем. Также реализована функция ассоциации выделенных событий с известными

региональными взрывами (см. столбец «Комментарий» на рис. 6).

Таким образом, с максимальным использованием вышеперечисленного программного обеспечения созданы подборки записей реальных событий за сутки для детальной сводной обработки. В среднем в сутки в период умеренной сейсмичности обрабатывается по ~25 землетрясений, а в период афтершоковых активизаций – до 1200 [Гилёва и др., 2017].

Обработка сейсмических событий

Далее производится обработка записей с волновыми формами (формат Baikal) со всех станций в подборке с помощью программы ХХ (автор В.М. Семибаламут). Программа проста и удобна, имеет все функции, необходимые для станционной обработки региональных землетрясений (рис. 8). С её помощью с 2002 г. обработано около 200 тыс. событий.

Для определения точного момента вступления можно моментально оставить на экране один канал, по времени развернуть максимально до 1.64 с (164 точки). Время положения курсора после краткого диалога о типе волны и чёткости вступления уходит в протокол. Максимальные амплитуды и периоды могут быть измерены как по положению установленных курсоров, так и автоматически при условии уже наличия в протоколе вступлений основных прямых продольной (Pg) и поперечной (Sg) волн. Попавшие в протокол данные без дополнительных указаний используются для расчёта других зависимых

от них параметров (T_0 , Δ , K_p), которые сразу появляются в протоколе обработки. Имеется возможность преобразования записи: фильтрация, интегрирование, дифференцирование, спектральный анализ. Возможность работы с шестиканальными записями (велосиграны и акселерограммы) необходима и часто используется в случае сильных землетрясений. Есть возможность определения знаков и амплитуд первых вступлений прямой (Pg) и преломлённой (Pn) волн как с установленных курсоров, так и автоматически.

Интерфейс программы ХХ имеет признаки эргономичности: контрастный экран; разный цвет каналов записи позволяет определить, с каким каналом работает сотрудник; управлением одной кнопкой реализованы функции изменения временного масштаба, перемещение записи и др. При этом обеспечивается удобная и комфортная работа сотрудника при обработке сейсмограмм.

Обработанные фрагменты записей всех станций в подборке события собираются (программно) в исходный файл для сводной обработки, которая осуществляется региональной программой R [Голенецкий, 1988; Голенецкий, Первалова, 1984], минимизирующей сумму квадратов невязок моментов вступлений прямых продольных Pg и поперечных Sg сейсмических волн. В расчётах используется однослойная модель земной коры мощностью 40 км со средними скоростями основных сейсмических волн: $V_p=6.15$ км/с, $V_s=3.58$ км/с.

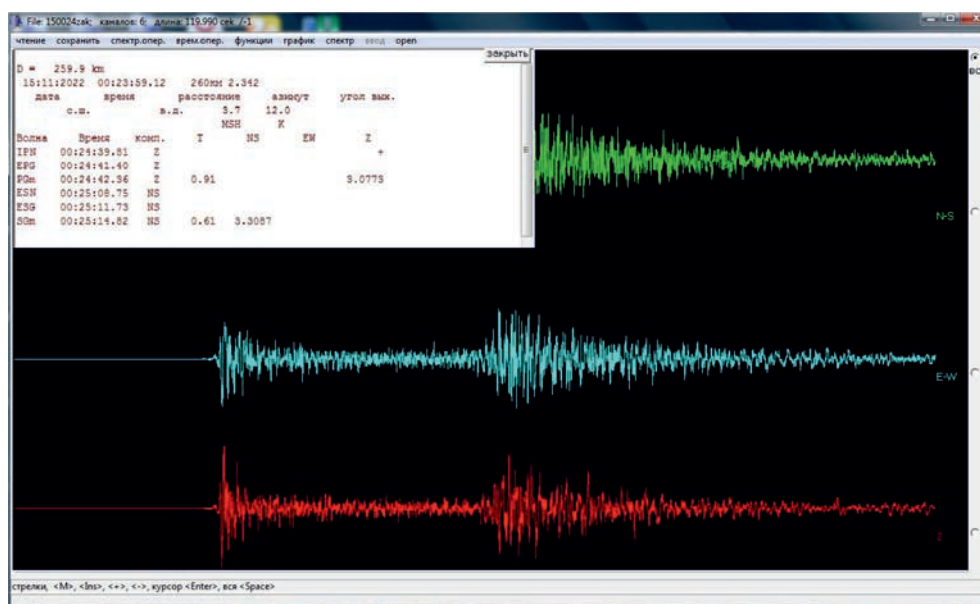


Рис. 8. Окно программы станционной обработки ХХ трёхканальной записи землетрясения 15.11.2022 г. на сейсмостанции ZAK

Результат сводной обработки иллюстрируется (программа Zasechki) с целью оценки качества локализации эпицентров (по невязкам основных волн), а также достаточности азимутального покрытия (рис. 9). Если необходимо, расчёт корректируется, пересматриваются или добавляются фазы, станции и т.д.

В рутинной сводной обработке региональная программа R [Голенецкий, 1988; Голенецкий, Первалова, 1984] с заложенными средни-

ми скоростями для региона используется до сих пор, так как со времени разработки программы условия регистрации в регионе улучшились умеренно. Число сейсмических станций в пределах зоны за последние 30 лет возросло лишь на 22% ($N_{ST\ 1992\ г.} = 28$, $N_{ST\ 2022\ г.} = 36$), а среднее расстояние между постоянными региональными сейсмостанциями сократилось со 115 км в 1992 г. лишь до 99 км в 2022 году. Для периодов и районов локальных наблюдений за сейсмическими

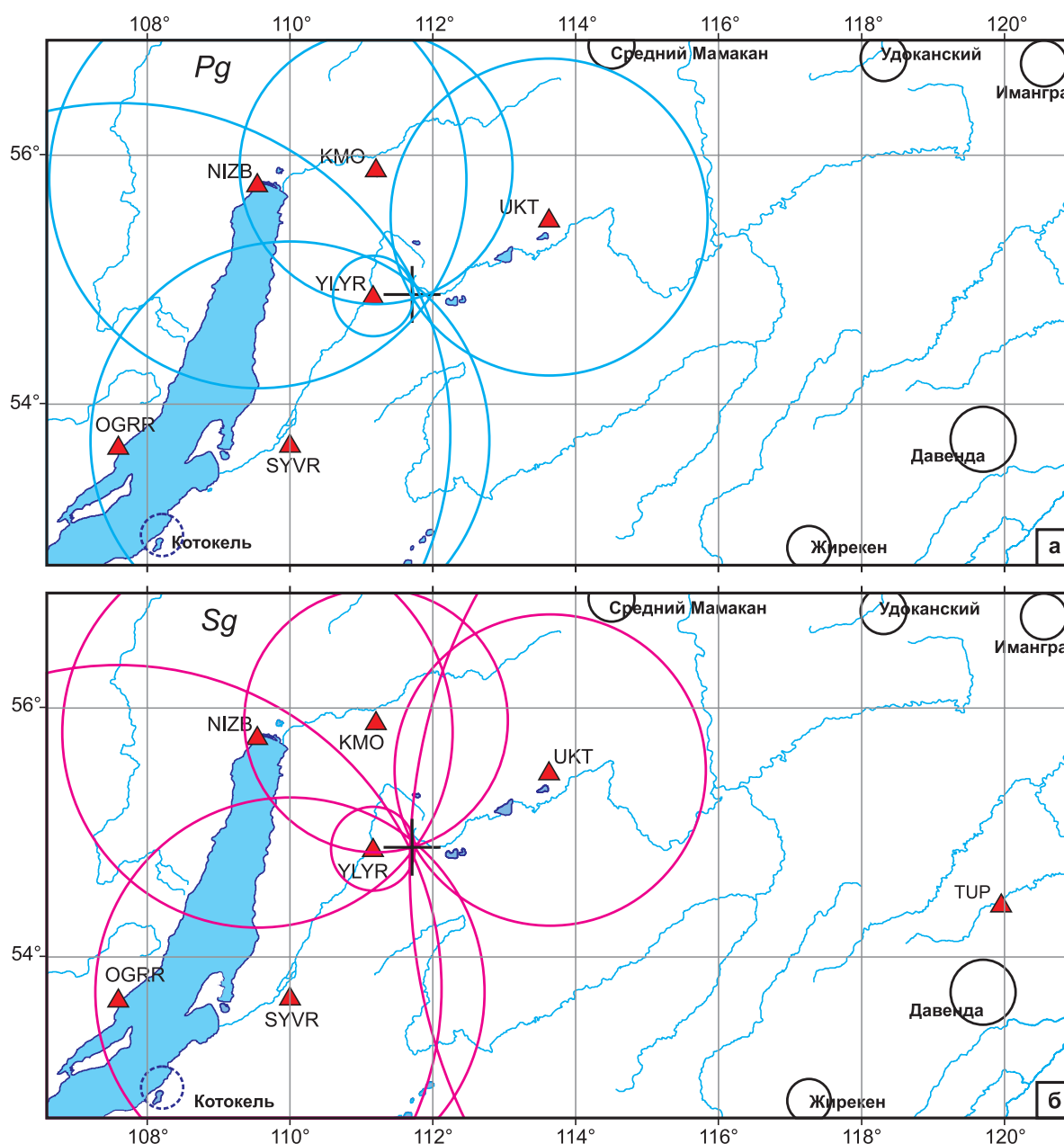


Рис. 9. Пример работы программы Zasechki для землетрясения 31.10.2019 г. в $15^h 2^m 11.6 \pm 0.6^s$; $\varphi = 54.89 \pm 0.03^\circ N$; $\lambda = 111.71 \pm 0.04^\circ E$; $h = 10 \pm 9$ км; $K_p = 6.9 \pm 0.4$.

Расчёт производился по данным семи станций, фазы Pg – по шести станциям (рис. 9 а), Sg – по семи станциям (рис. 9 б). Треугольники – сейсмические станции, чёрными кружками очерчены районы промышленных взрывов

активизациями используются другие программы (Hypoinverse 2000, Hypocentr, VELEST, HypoDD) [HYPOINVERSE ..., 2023; Lienert et al., 1986; 1995; Kissling, 1995; Waldhauser, 2001] и другие (локальные) скоростные модели.

База данных сейсмологических наблюдений территории Прибайкалья и Забайкалья

В процессе детальной сводной обработки бюллетени отдельных событий собираются посуточно, далее ежемесячно и, после проверки, заносятся в базу данных [Гилёва, 2014; 2015; 2017; 2018].

База данных сейсмологических наблюдений территории Прибайкалья и Забайкалья содержит полные сведения обо всех землетрясениях ($N > 225000$ с $K_p \geq 3$) за период наблюдений 1994–2019 гг., полученные при обработке аналоговых и цифровых записей сейсмических станций Прибайкалья, Забайкалья и прилегающих территорий.

В базе данных содержится следующая информация:

1 – все исходные данные, снятые с сейсмограммы на конкретной станции: моменты вступлений всех сейсмических волн, максимальные амплитуды и их периоды, знаки, амплитуды и периоды первых вступлений;

2 – результаты станционной обработки для каждой станции: эпицентральное расстояние от станции, время в очаге, энергетический класс;

3 – результаты сводной обработки по данным всех сейсмических станций, зарегистрировавших землетрясение, т.е. основные параметры землетрясений с их погрешностями определения (дата и время события, координаты гипоцентра, энергетический класс);

4 – макросейсмическая информация об ошутимости землетрясения в разных населённых пунктах в баллах по шкале MSK-64 (рис. 10).

Реализуются выборки из базы: по периоду времени в сутках; в пределах или вне прямоугольной площадки на поверхности в градусах; в пределах круга или кольца вокруг заданной сейсмостанции (км); по интервалу энергетического

Дата	Время	\pm	ϕ	\pm	λ	\pm	Н	\pm	h	кл	К	\pm	Примечания
02.11.2019	8:30:42.0	0.531	54.89	0.03	111.67	19	9	6.1	0.192				
03.11.2019	5:53:14.7	0.525	55.18	0.02	111.01	23	7	6.9	0.398				
04.11.2019	10:30:11.3	0.119	54.88	0.01	111.69	9	2	2	12.9	0.172			Янчужан 2-3 балла
04.11.2019	10:43:24.0	0.631	54.83	0.03	111.7	14	15	6.4	0.13				
04.11.2019	10:45:39.9	0.780	54.89	0.03	111.71	8	21	6.6	0.371				
04.11.2019	10:58:02.6	0.813	54.89	0.03	111.71	11	17	6.7	0.436				
04.11.2019	11:01:37.3	0.322	54.98	0.04	111.62	25	11	6.4	0.405				
04.11.2019	11:03:47.0	0.160	54.91	0.01	111.69	5	4	7.6	0.212				
04.11.2019	11:04:39.7	0.512	54.93	0.02	111.67	10	13	7.3	0.262				
04.11.2019	11:06:44.2	0.532	54.91	0.02	111.66	12	11	8	0.151				
04.11.2019	11:31:14.3	0.817	54.93	0.03	111.66	10	17	6.1	0.545				
04.11.2019	11:40:07.7	0.234	54.88	0.02	111.7	9	5	7.4	0.155				
04.11.2019	11:51:05.0	0.665	54.97	0.02	111.58	24	7	6.1	0.48				
04.11.2019	11:52:52.6	0.727	54.9	0.02	111.71	10	16	6.1	0.535				

Волна	Времена вступлений волн		Периоды и амплитуды макс. смещений		Дополнительно	Исходник
	Данные станции	Невязки вступления волн	Периоды	Амплитуды		
PG	N5	-	8.423			
PG	EW	-	4231.863			
PG	Z	+	8626.650			

Рис. 10. Интерфейс приложения к базе данных сейсмологических наблюдений территории Прибайкалья и Забайкалья

класса; по наличию данных близких сейсмостанций; по наличию данных о знаках и амплитудах первых вступлений, фаз разных сейсмических волн, данных о глубинах; а также по предложенному списку, содержащему время возникновения землетрясения (год, месяц, число, час, минута). Выборки производятся по всем возможным вариациям выше перечисленных параметров. Реализованы несколько вариантов форм отчётов с каталогами, бюллетенями и т.д.

Из распределения (рис. 11) числа землетрясений в год следует, что с переходом от аналоговой регистрации к цифровой (2000–2001 гг.) и началом использования программ цифровой обработки значительно увеличилось число регистрируемых землетрясений без роста числа сейсмостанций. Далее (с 2002 г.) годовое число землетрясений сохранялось на уровне не менее 7 тыс. с аномальным количеством более 36 тыс. в 2015 году.

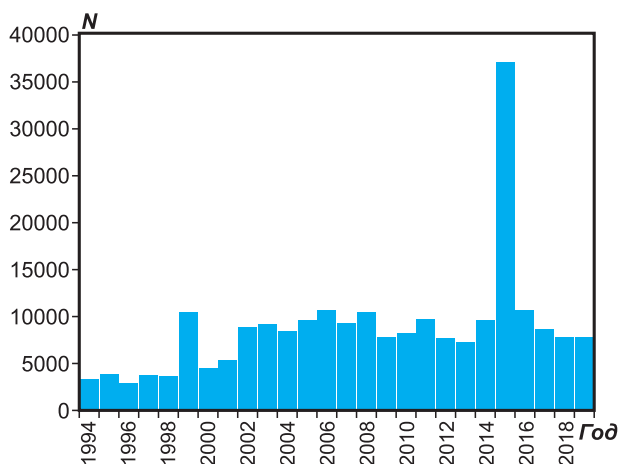


Рис. 11. Распределение по годам числа землетрясений, подробные данные о которых содержатся в базе данных сейсмологических наблюдений территории Прибайкалья и Забайкалья

На рис. 1 представлена визуализация приблизительно одной трети всей базы данных (78943 события с $K_p > 6.5$). Иллюстрация позволяет составить исчерпывающее впечатление о структуре сейсмичности в региональном масштабе. В пределах Байкальской рифтовой зоны отчетливо выделяются как области с высокой концентрацией эпицентров, так и почти асейсмичные районы.

Регулярное пополнение базы данных осуществляется по мере полной обработки месячного периода наблюдений в среднем на 700–800 землетрясений. Дополнение базы данными ранее 1994 г. возможно только при определенных усилиях, так как бюллетени сохранены только в печатном виде.

Примеры результатов детальной сводной обработки землетрясений

Обработка данных региональных станций в 2019 г.

В 2019 г. обработка сейсмических событий в регионе обеспечивалась преимущественно данными сейсмостанций Байкальского (на 81%) и Бурятского (на 15%) филиалов (рис. 3). Данные других сетей при обработке использовались реже, преимущественно для землетрясений приграничных территорий. В границах зоны Прибайкалья и Забайкалья в 2019 г. зарегистрировано 7273 землетрясения, большинство из них (62%) являются слабыми ($K_p = 6$). Для обработки этих событий использовались в среднем данные лишь 5–6 станций, или 9–10 фаз основных сейсмических волн (табл. 1), при этом ошибка определения координат невелика, в среднем составила менее 5 км. Для землетрясений с $K_p \geq 9$ использовались в среднем данные 15–35 станций, или 30–62 фазы, что обеспечивало точность локализации эпицентров преимущественно в пределах 2 км, а ошибка определения момента очага составила $\sigma T_0 = 0.2–0.3$ с. Таким образом, несмотря на редкую (в масштабах рассматриваемого региона) сеть станций, обработка местных землетрясений здесь осуществляется на хорошем уровне.

С использованием региональной программы обработки R только для 38% ($N = 2740$) землетрясений за 2019 г. определены глубины очагов ($h = 12–24$ км) с ошибкой менее 70%, что является ненадежными результатами. Это объясняется редкой сетью станций со средним расстоянием между пунктами наблюдений в настоящее время ~ 100 км. Очевидно, что для получения надежных данных о глубинах очагов в регионе необходима более густая сеть сейсмических станций.

Классическое значение ($\gamma = -0.50 \pm 0.01$) угла наклона графика повторяемости (рис. 12) для землетрясений зоны Прибайкалья и Забайкалья за 2019 г. получено по данным с $K_p = 7–13$. Точка с $K_p = 6$ не ложится на прямую, так как слабые землетрясения энергетического класса $K_p = 6$ в настоящее время не являются представительными на всей территории зоны, а регистрируются только на $\sim 75\%$. Точка, касающаяся $K_p = 14$, не участвует в расчёте наклона графика вследствие непредставительности таких редких сильных событий из-за короткого периода времени.

Таблица 1. Средние величины параметров региональной обработки землетрясений зоны Прибайкалья и Забайкалья ($K_p=5.6-14.4$) за 2019 г.

K_p	N землетрясений за 2019 г.	Средние величины параметров на одно землетрясение					
		число используемых станций	число фаз, используемых для локализации	$\sigma T_0, c$	$\sigma \varphi, ^\circ$	$\sigma \lambda, ^\circ$	σK_p
6 (5.6–6.5)	4503	5.5 (3–9)	9.4 (5–16)	0.8	0.04	0.05	0.8
7 (6.6–7.5)	1879	7.1 (3–10)	12.8 (4–19)	0.5	0.03	0.04	0.5
8 (7.6–8.5)	622	8.9 (5–29)	16.9 (6–51)	0.4	0.02	0.03	0.3
9 (8.6–9.5)	192	14.5 (8–36)	26.9 (12–64)	0.3	0.01	0.02	0.3
10–14.4 (9.6–14.4)	77	34.5 (15–40)	62.1 (25–79)	0.2	0.01	0.01	0.2

Примечание – σT_0 – стандартная ошибка определения времени в очаге в секундах, $\sigma \varphi$ – ошибка определения координаты широты в градусах, $\sigma \lambda$ – ошибка определения долготы в градусах, σK_p – ошибка определения энергетического класса. В скобках показаны минимальные и максимальные значения.

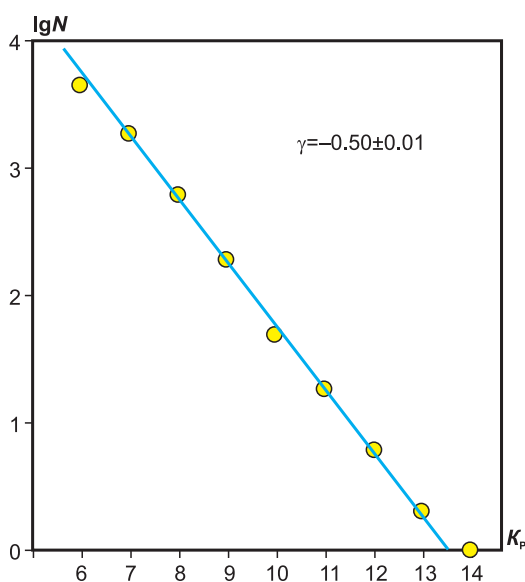


Рис. 12. График повторяемости землетрясений зоны Прибайкалья и Забайкалья по данным с $K_p=7-13$ за 2019 г.

Из общего числа зарегистрированных событий в 2019 г. отсеяно 2006 взрывов.

Обработка данных региональных и локальных станций

Улучшение качества определений основных параметров сейсмических событий и, соответственно, точности полученных решений можно наблюдать при дополнительном использовании данных локальных станций. Это наглядно демонстрируют результаты детальных наблюдений многочисленных Култукской 2008 г. и Муяканской 2014–2015 гг. последовательностей землетрясений [Мельникова и др., 2014; Melnikova et al., 2012; Melnikova et al., 2022].

В 2008 г. в южной оконечности оз. Байкал произошло сильное Култукское землетрясе-

ние (27.08.2008 г. с $M_w=6.3$), сопровождавшееся афтершоками. Наблюдения за этой активизацией в течение 2.5 месяцев осуществлялись с помощью локальной временной сети из 11 пунктов ($\Delta < 40$ км). Полученные материалы позволили надёжно локализовать более 800 гипоцентров (рис. 13, 14) и получить детальную картину пространственно-временного хода афтершокового процесса. Как видно из рис. 13, подавляющее большинство гипоцентров землетрясений имеют глубины $h=8-14$ км, при этом стандартные ошибки для большинства событий невелики: среднеквадратичная ошибка определения времени в очаге $RMS \leq 0.2$ с; ошибка определения горизонтальных координат эпицентра $ERH \leq 1$ км; ошибка определения по глубине $ERZ \leq 1.2$ км. В выявленном активном объёме земной коры значения глубин существенно меняются, например, в направлении с юга на север (разрез А–В).

Наблюдения за крупнейшей в регионе Муяканской последовательностью 2014–2015 гг., произошедшей в Северо-Муяканском районе БРЗ, осуществлялись, наряду с региональной сетью, шестью локальными временными станциями ($\Delta=5-35$ км), действующими в январе-марте 2015 г. [Гилёва и др., 2021]. В эпицентральной зоне этой активизации за полтора месяца было зафиксировано около 18 тыс. землетрясений ($K_p \geq 3$), что примерно в 7 раз больше, чем с использованием данных только постоянных пунктов наблюдения. Точность определения пространственной локализации землетрясений позволила с уверенностью заключить, что большая часть Муяканских землетрясений, разделившихся в пространстве на два крупных кластера (рис. 15), локализована в верхней части земной коры ($h=3-11$ км) [Melnikova et al., 2022].

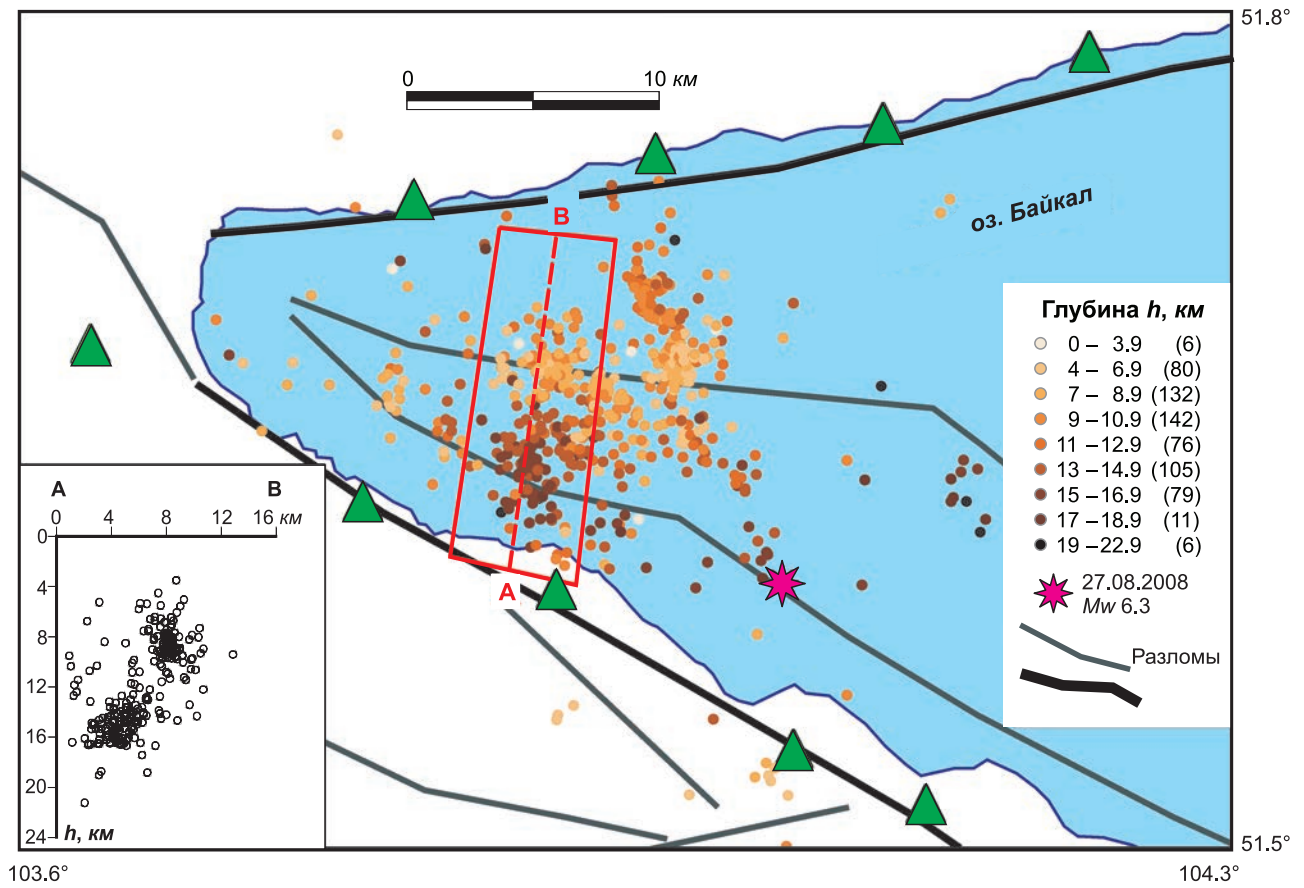


Рис. 13. Карта афтершоков Култукского землетрясения с разными глубинами гипоцентров. На врезке приведён разрез А–В поперёк акватории оз. Байкал.

Треугольники – сейсмические станции

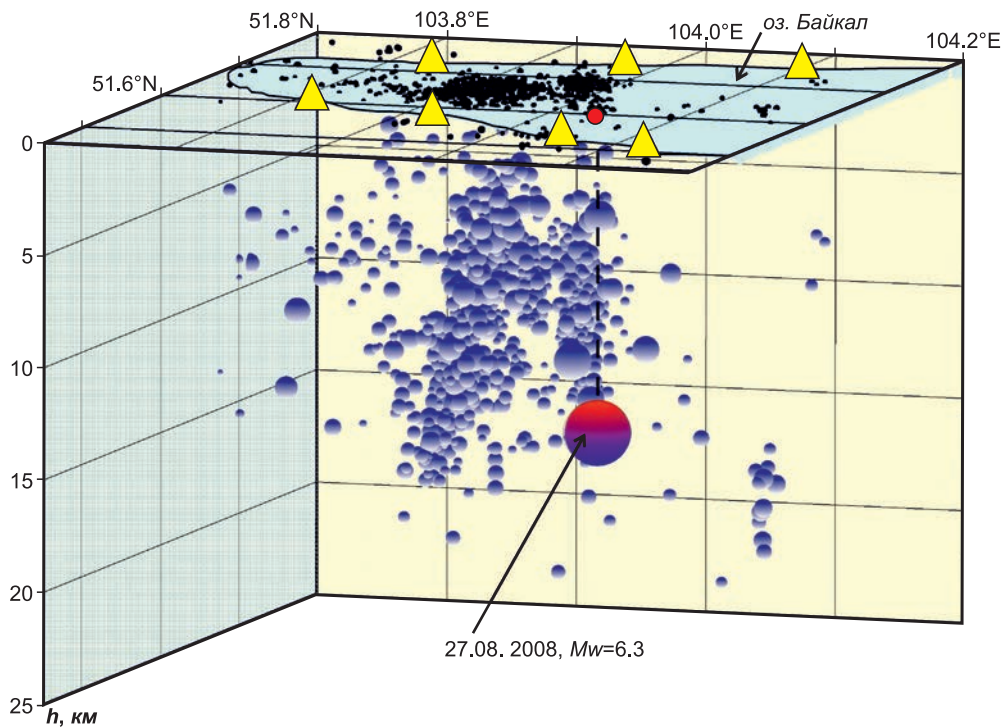


Рис. 14. Гипоцентральное поле Култукских землетрясений в 3D-проекции

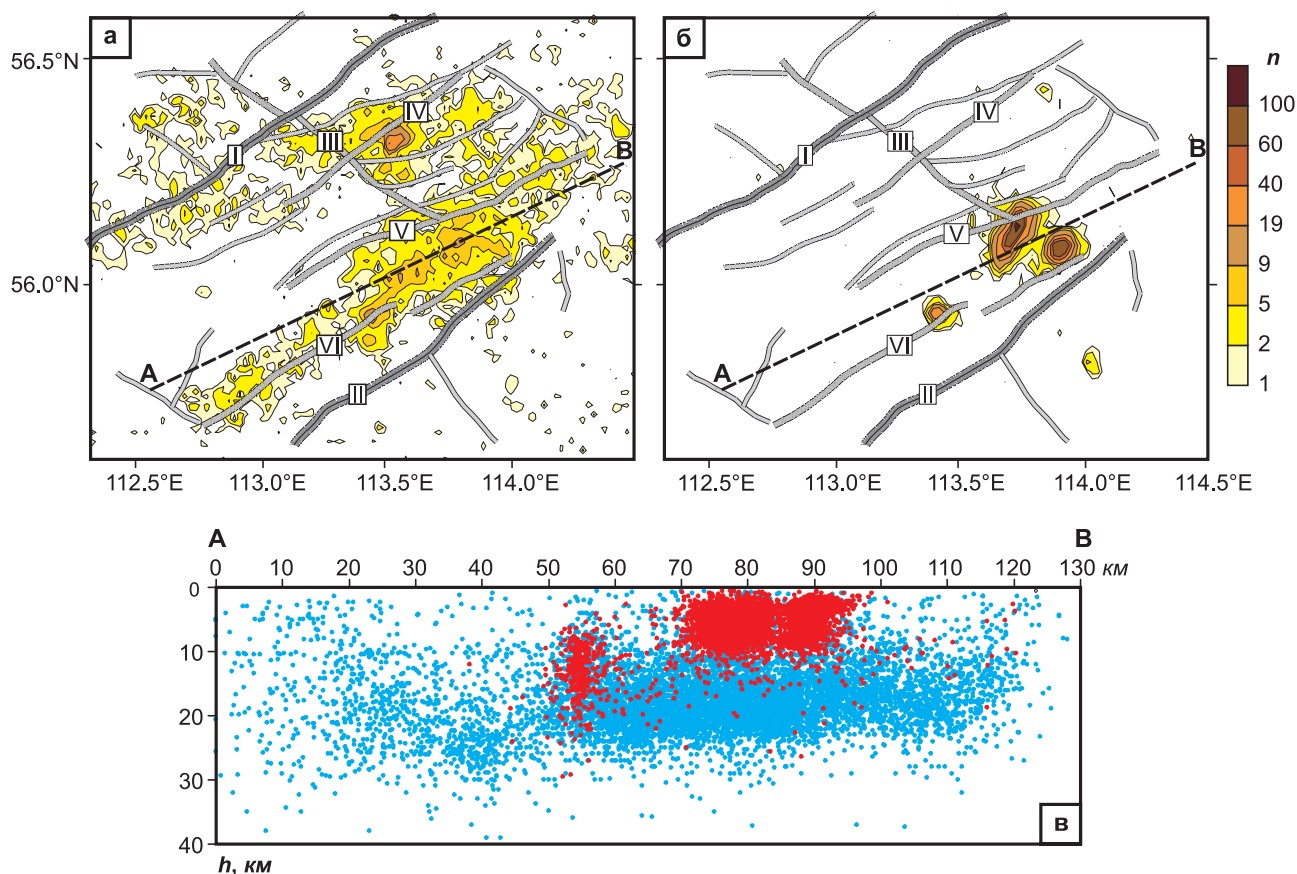


Рис. 15. Карты плотности эпицентров землетрясений ($M \geq 1.5$) в Северо-Муйском районе в 1970–2013 гг. (а), в 2014–2018 гг. (б) и поля гипоцентров землетрясений (в) по разрезу А–В.

На панелях (а) и (б) n – количество землетрясений, произошедших в единичном окне осреднения размерами $\varphi = 0.01^\circ$ и $\lambda = 0.02^\circ$. На панели (в) синими и красными точками показаны гипоцентры землетрясений, зарегистрированных в 1970–2013 гг. и 2014–2018 гг. соответственно. Разломы: межблоковые (I – Северо-Муйский, II – Верхне-Муйский), внутриблоковые (III – Перевальный, IV – Ангараканский, V – Муяканский, VI – Южно-Муяканский), и локальные внутриблоковые

Сравнение с другими филиалами ФИЦ ЕГС РАН объёмов обработки

Используя данные ежегодников «Землетрясения Северной Евразии», сравним количество зарегистрированных и обработанных землетрясений для разных регионов России (табл. 2, рис. 16). По данным за четыре года (2014–2017 гг.) по числу землетрясений регион Прибайкалья и Забайкалья ($N=63081$) превосходит любой из остальных сейсмически активных регионов России как минимум в 2.4 раза (Алтай и Саяны – $N=26458$; Камчатка и Командорские острова – $N=26301$), а некоторых – более чем в 60 раз.

Уже в течение 20 лет (с начала 2003 г.) бюллетени землетрясений Прибайкалья и Забайкалья регулярно передаются в Международный сейсмологический центр ISC [*International ...*, 2023]

в формате ISF [*IASPEI ...*, 2023] как в оперативном режиме, так и по мере завершения детальной сводной обработки ($K_p > 8.5$) в филиале. В настоящее время бюллетени семи регионов России в формате ISF доступны в ISC и публикуются в ежегодниках «Землетрясения России» [*Землетрясения ...*, 2022] (табл. 3). Очевидно, что землетрясения и системы обработки на территориях разные, но по некоторым параметрам их можно сопоставить и, в совокупности с данными табл. 2, оценить общие объёмы обработки.

По числу сейсмических станций, данные которых используются при обработке одного землетрясения, и числу фаз сейсмических волн близки регион Прибайкалья, Забайкалья и Северный Кавказ: станций 29 и 33 соответственно; фаз 87 (Pg , Sg , Pn , Sn и др.) и 68 (преимущественно Pg и Sg , а также Pn , Sn). Камчатка и Командорские острова – на одно землетрясение

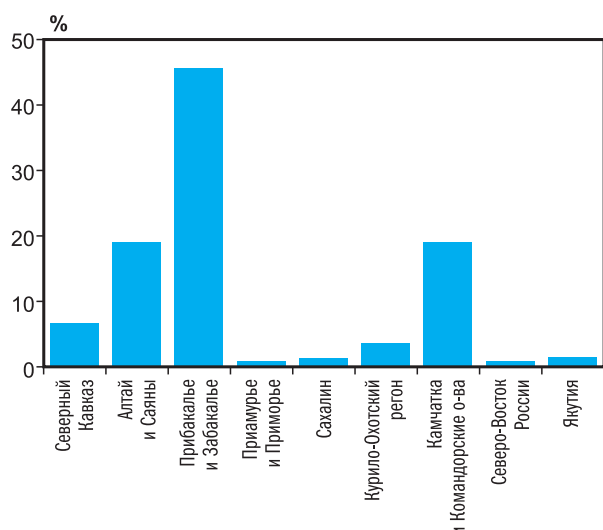
Таблица 2. Число землетрясений для разных сейсмически активных регионов России за период 2014–2017 гг.

Территория	Число землетрясений				Примечание
	2014 г.	2015 г.	2016 г. +2017 г.	итого	
Северный Кавказ	1695	2421	5594	9710	[Габсатарова и др., 2020; 2021; 2022]
Алтай и Саяны	8828	6206	11424	26458	[Еманов и др., 2020; 2021; 2022]
Прибайкалье и Забайкалье	8782	36430	17869	63081	
Приамурье и Приморье	390	296	376	1062	
Сахалин	414	375	997	1786	[Фокина и др., 2020а; 2020б; 2021; 2022; Коваленко и др., 2020]
Курило-Охотский регион	1013	833	3082	4928	
Камчатка и Командорские острова	5626	6399	14276	26301	[Чебров и др., 2020; 2021; 2022]
Северо-Восток России	239	272	578	1089	[Алёшина и др., 2020; 2021; 2022]
Якутия	718	607	801	2126	[Козьмин и др., 2020; Шибаев и др., 2021; 2022]

Таблица 3. Средние величины параметров обработки землетрясений с $K \geq 9.0$ нескольких сейсмически активных регионов Российской Федерации, представленных в ISC в формате ISF в 2020 г.

Территория	N земл.	Средние величины на одно землетрясение													
		Err, RMS, c	K	$\Delta_{min}, ^\circ$	$\Delta_{max}, ^\circ$	N станций	число фаз сейсмических волн								
							P	S	Pg	Sg	Pn	Sn	др.	ИТОГО фаз	
Камчатка и Командорские острова	989	1.5	9.8	1.4	6.1	23	22	10							32
Курило-Охотский регион	513	0.3	9.9	1.6	46.0	21	21	7							28
Прибайкалье и Забайкалье	122	0.2	10.3	0.5	7.6	29			25	29	14	6	13		87
Северо-Восток России	116		10.1	3.0	7.8	6	3	1	3	6			1		14
Северный Кавказ	91	0.8	9.7	0.4	3.6	33			25	25	9	9			68
Приамурье и Приморье	22	0.6	10.0	1.4	9.9	8	2		5	7	1		1		16
Сахалин	16	0.4	9.6	0.5	32.1	16	11	1	9	8					29

Примечание – RMS – (Root Mean Square) – среднеквадратичная ошибка определения времени в очаге в секундах; K – (Energy_class) приводится в ISC без различия региональных версий; Δ_{min} , Δ_{max} – минимальное и максимальное расстояние от сейсмостанции до эпицентра в градусах; P , S , Pg , Sg , Pn , Sn – фазы сейсмических волн (<http://www.isc.ac.uk/standards/phases/>).

**Рис. 16.** Число землетрясений в процентах от общего числа землетрясений на территории России для разных сейсмически активных регионов за период 2014–2017 гг.

в среднем 23 станции, фаз в среднем 32 (волны P и S). Северо-Восток России — лишь шесть станций и 14 фаз в среднем на одно землетрясение. Т.е. объём обработки на одно событие для разных регионов значительно отличается.

В целом объём обработки землетрясений в Байкальском филиале значительно больше, чем в любом из филиалов ФИЦ ЕГС РАН.

Обсуждение

Высокий уровень сейсмичности Прибайкалья и Забайкалья свидетельствует о современной тектонической активности геологических структур региона и требует тщательного анализа. Исходя из существующей системы наблюдений, информация о региональном сейсмическом процессе, получаемая в БФ, на сегодняшний день является оптимальной. Однако, как показывает практика, существуют серьёзные проблемы, связанные с малым количеством сейсмических станций и их оборудованием, что отрицательно сказывается на полученных данных и последующем их детальном анализе.

В последние годы в Байкальском филиале произошла значительная задержка в детальной сводной обработке в связи с крупной Муяканской последовательностью землетрясений [Melnikova et al., 2022]. Чтобы сократить отставание, начиная с детальной обработки за 2017 г. предприняты следующие действия: прекращена обработка слабых событий с энергетическим классом $K_p < 5.6$; не производится полная обработка взрывов, а только минимальная локация для диагностики; увеличено до четырёх минимальное количество станций, используемое при обработке слабых землетрясений; установлены ограничения на число используемых станций в зависимости от силы события. Такие меры позволили немного уменьшить отставание (сейчас — менее трёх лет). Тем не менее, проблема вновь возникла в 2021 г., который также можно считать аномальным по числу событий за счёт Хубсугульской последовательности с сильнейшим землетрясением 11 января 2021 г. ($M_w=6.7$).

Для решения имеющейся проблемы возможны следующие варианты действий.

Увеличение нормы. В секторе сводной обработки для каждой должности имеется недельная норма обработки, которая периодически корректируется согласно каким-либо значимым изменениям в процессе работы на основании хронометража. Сейчас резервы для повышения нормы сотрудникам отсутствуют.

Переход на автоматическую обработку.

В Байкальском филиале используются программы автоматической обработки:

1 — программа автоматической обработки AutoVukl [Хритова, 2015] используется в реальном времени для обработки срочных и оперативных землетрясений ($K_p \geq 9.5$) с 2012 г.;

2 — программа NSDL (NSS) [Асминг и др., 2017; 2018] применяется для распознавания событий уже несколько лет, что ускоряет работу сотрудников сектора сводной обработки;

3 — программа обработки афтершоковых последовательностей [Хритова, Гилёва, 2022] оттестирована и используется с 2022 г. для обработки Хубсугульских землетрясений.

На основании тестирования и опыта работы с этими программами (хорошими с нашей точки зрения) считаем, что заменить существующую детальную обработку на сегодняшний момент они не могут. Переход на какую-либо автоматическую обработку без потери значительного количества землетрясений и, особенно, качества обработки может быть осуществлён только со значительным увеличением числа пунктов наблюдений.

Обработка слабых землетрясений. Прекращение или сокращение обработки непредставительных энергетических классов землетрясений заметно ограничивает объём сейсмологических данных, что безусловно повлияет на результаты изучения пространственно-временной структуры сейсмичности и очаговых зон сильных землетрясений.

Заключение

В результате анализа состояния и перспектив детальной обработки землетрясений Прибайкалья и Забайкалья установлено следующее.

На всех этапах работы в БФ ФИЦ ЕГС РАН в полном объёме используется современное программное обеспечение, в том числе разработанное в БФ.

В настоящее время с учётом размеров региона, количества сейсмических станций, качества связи и числа регистрируемых землетрясений их обработка в БФ ФИЦ ЕГС РАН осуществляется оптимальным образом.

Землетрясения непредставительных энергетических классов составляют более 50% всех сейсмических событий региона, поэтому их обработка необходима для решения научных и практических задач.

Аномальное количество зарегистрированных землетрясений в регионе в 2015 и 2021 гг.

в последующие годы, вероятнее всего, снизится до обычного уровня, что позволит постепенно ликвидировать отставание в обработке.

Переход к новой системе обработки, с большим участием автоматических программ, оправдан при значительном увеличении числа сейсмических станций в регионе.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Литература

- Алёшина Е.И., Курткин С.В., Карпенко Л.И. Северо-Восток России // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 183–191. DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.17. – EDN: TGFVWV
- Алёшина Е.И., Курткин С.В., Карпенко Л.И. Сейсмичность Северо-Востока России в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 24 (2015 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 164–172. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.15. – EDN: AORKRT
- Алёшина Е.И., Курткин С.В., Карпенко Л.И. Сейсмичность Северо-Востока России в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 176–186. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.15. – EDN: XJTPYE
- Асминг В.Э., Гилёва Н.А., Карпинский В.В. Опыт внедрения системы NSDL в ФИЦ ЕГС РАН // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 30–34. – EDN: YNOGPI
- Асминг В.Э., Федоров А.В., Прокудина А.В., Евтюгина З.А. Автоматическая система мониторинга региональной сейсмичности NSDL. Принципы построения и некоторые результаты использования // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 33–36. – EDN: ZPNIHV
- Бюллетень Постоянной центральной сейсмической комиссии. 1902. Январь–июнь // Известия Постоянной центральной сейсмической комиссии. Т. 1, вып. II. – СПб.: Типография Императорской АН, 1903. – С. 1–104.
- Вознесенский А.В. Список землетрясений по наблюдениям Иркутской магнитно-метеорологической обсерватории. № 1. – Иркутск: Паровая типо-литография П.И. Макушина, 1902. – 22 с.
- Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Иванова Л.Е., Саяпина А.А., Багаева С.С., Адилев З.М., Асманов О.А. Сейсмичность Северного Кавказа в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 24 (2015 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 69–83. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.06. – EDN: ORCRZJ
- Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Иванова Л.Е., Саяпина А.А., Багаева С.С., Адилев З.М., Асманов О.А. Сейсмичность Северного Кавказа в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 74–86. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.06. – EDN: QPXOME
- Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Саяпина А.А., Багаева С.С., Адилев З.М., Асманов О.А. Северный Кавказ // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 68–81. DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.06. – EDN: TYGODF
- Гилёва Н.А. База данных сейсмологических наблюдений Южно-Байкальского района Байкальской рифтовой зоны за 1994–2012 гг. / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620487 от 26.03.2014 г.
- Гилёва Н.А. База данных сейсмологических наблюдений Байкало-Муйского района Байкальской рифтовой зоны за 1994–2013 гг. / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015621528 от 07.10.2015 г. – EDN: ZMMKFY
- Гилёва Н.А. База данных сейсмологических наблюдений Хубсугул-Тункинского района Байкальской рифтовой зоны за 1994–2014 гг. / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620826 от 02.08.2017 г. – EDN: TVWNOP
- Гилёва Н.А. База данных сейсмологических наблюдений Кодаро-Удоканского района Байкальской рифтовой зоны за 1994–2014 гг. / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621034 от 10.07.2018 г. – EDN: XUNYUN
- Гилёва Н.А., Масальский О.К., Кобелева Е.А. Эпицентральная область Муяканской последовательности землетрясений (Бурятия) // Землетрясения России в 2015 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 103–107. – EDN: ZIEVID
- Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Филиппова А.И., Радзиминович Я.Б., Кобелева Е.А. Муяканская последовательность землетрясений в 2015 г. (Северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 24 (2015 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 245–257. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.24. – EDN: NCXKNJ
- Голенецкий С.И. Землетрясения Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения в СССР в 1985 году. – М.: Наука, 1988. – С. 124–135.
- Голенецкий С.И., Первалова Г.И. Программа определения основных параметров землетрясений по наблюдениям региональной сети сейсмических станций Прибайкалья // Применение математических методов и ЭВМ в геологии и геофизике: Сборник алгоритмов и программ. – Иркутск, 1984. – С. 35–54. Деп. в ВИНИТИ 03.12.1984, № 7675.

- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. Алтай и Саяны // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 23 (2014 г.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. — С. 122–129. DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.11. — EDN: XBLRXU
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. Сейсмичность Алтае-Саянского региона в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 24 (2015 г.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. — С. 122–128. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.11. — EDN: GGVHUE
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. Сейсмичность Алтае-Саянского региона в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 25 (2016–2017 гг.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. — С. 129–136. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.11. — EDN: SYTVMB
- Землетрясения России в 2020 году. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. — 204 с. — EDN: ZZOKKG
- Кобелева Е.А., Гилёва Н.А., Хамидулина О.А., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения России в 2020 году. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. — С. 45–52. — EDN: CLFOAC
- Коваленко Н.С., Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В. Приамурье и Приморье // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 23 (2014 г.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. — С. 140–151. DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.13. — EDN: ZKUUJE
- Козьмин Б.М., Шибаев С.В. Якутия // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 23 (2014 г.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. — С. 192–198. DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.18. — EDN: WPUHWP
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Курушин Р.А., Масальский О.К., Шлаевская Н.С. Выделение условных районов для ежегодных обзоров сейсмичности региона Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. — Обнинск: Изд-во ФОП, 2003. — С. 107–117. — EDN: VBAGBP
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. с $K_p=15.9$, $M_w=6.3$, $I_0=8-9$ (Южный Байкал) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. — Обнинск: ГС РАН, 2014. — С. 386–407. — EDN: UDUBOV
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Филиппова А.И., Радзиминович Я.Б., Кобелева Е.А. Сейсмичность Прибайкалья и Забайкалья в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 24 (2015 г.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. — С. 129–138. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.12. — EDN: JCDDFK
- Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Дорошкевич Е.Н., Костылев Д.В. Курило-Охотский регион // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 23 (2014 г.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020а. — С. 162–171. DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.15. — EDN: AJORKV
- Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Михайлов В.И. Сахалин // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 23 (2014 г.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020б. — С. 152–161. DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.14. — EDN: CZHVVC
- Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Михайлов В.И. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2015 году // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 24 (2015 г.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. — С. 139–152. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.13. — EDN: OHBBDR
- Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 25 (2016–2017 гг.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. — С. 146–163. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.13. — EDN: UCRNZJ
- Хритова М.А. Программа автоматической обработки региональных землетрясений Прибайкалья и Забайкалья AutoBykl / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661500 от 29.10.2015 г. — EDN: FWNESO
- Хритова М.А. Программа проверки корректности данных шестиканальных сейсмических записей «CheckAgent» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017610336 от 10.01.2017 г. — EDN: SBANRM
- Хритова М.А. Программа формирования подборок стационарных записей для землетрясений DCEvents / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022666091 от 25.08.2022 г. — EDN: OZWDFR
- Хритова М.А., Гилёва Н.А. Система проверки качества работы каналов ЦСС в Байкальском филиале ГС СО РАН // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы VIII Международной сейсмологической школы. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2013. — С. 337–341. — EDN: SSTOAP
- Хритова М.А., Гилёва Н.А. Программа обработки афтершоковых последовательностей землетрясений // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XVI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. — С. 99. — EDN: GSVIQX
- Чебров Д.В., Салтыков В.А., Дрознина С.Я., Ромашева Е.И., Митюшкина С.В., Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Раевская А.А., Матвеев Е.А. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 25 (2016–2017 гг.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. — С. 164–175. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.14. — EDN: VBTEYB
- Чебров Д.В., Салтыков В.А., Матвеев Е.А., Дрознина С.Я., Ромашева Е.И., Митюшкина С.В., Абубакиров И.Р., Павлов В.М. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. — Вып. 24 (2015 г.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. — С. 153–163. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.14. — EDN: FZNZSB

- Чебров Д.В., Чеброва А.Ю., Абубакиров И.Р., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Воропаев П.В., Дроздина С.Я. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 172–182. DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.16. – EDN ORWLTU
- Шибаетов С.В., Козьмин Б.М., Макаров А.А. Сейсмичность Якутии в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 24 (2015 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 173–181. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.16. – EDN: TMGQEE
- Шибаетов С.В., Geissler W., Козьмин Б.М., Туктаров Р.М., Макаров А.А. Сейсмичность Якутии в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 187–195. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.16. – EDN: XTGLLR
- Documentation for SeisComP 3 // SeisComp3 [Site]. – URL: <https://www.seiscomp.de/seiscomp3/doc.html> (дата обращения 02.02.2023).
- Emanov A.F., Emanov A.A., Shevkunova E.V., Fateev A.V., Gladyshev E.A., Arapov V.V., Artemova A.I., Podkorytova V.G., Chechel' nitskii V.V., Radziminovich Y.B., Kobeleva E.A. The Khuvsgul earthquake of January 12, 2021 ($M_w=6.7$, $M_L=6.9$) and early aftershocks // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2022. – V. 58, N 1. – P. 59–73. DOI: 10.1134/S1069351322100019. – EDN: EHDHBU
- Filippova A.I., Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Melnikova V.I., Radziminovich Y.B., Gileva N.A. Source process of the September 21, 2020 M_w 5.6 Bystraya earthquake at the south-eastern segment of the Main Sayan fault (Eastern Siberia, Russia) // *Tectonophysics*. – 2022. – V. 822. – P. 229162. DOI: 10.1016/j.tecto.2021.229162. – EDN: DQTTPV
- Fojtíková L., Vavryčuk V., Cipciar A., Madarás J. Focal mechanisms of micro-earthquakes in the Dobrá Voda seismoactive area in the Malé Karpaty Mts. (Little Carpathians), Slovakia // *Tectonophysics*. – 2010. – V. 492, N 1–4. – P. 213–229. DOI: 10.1016/j.tecto.2010.06.007. – EDN: NBDQNN
- HYPONVERSE Earthquake Location* // USGS. Software [Site]. – URL: <https://www.usgs.gov/software/hypoinverse-earthquake-location> (дата обращения 24.01.2023).
- IASPEI Seismic Format (ISF)* // International Seismological Center [Web Site]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/standards/isf/download/isf.pdf>, свободный (дата обращения 24.01.2023).
- International Seismological Centre (ISC)*. On-line Bulletin [Site]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>. – United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2023. DOI: 10.31905/D808B830
- Kissling E. Program VELEST user's guide – Short Introduction (second draft version). – ETH Zuerich: Institute of Geophysics, 1995. – 26 p. – URL: <https://manualzz.com/doc/4145990/program-velest-user-s-guide>
- Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Ostapchuk A.A. Seismic picture of a fault zone. What can be gained from the analysis of fine patterns of spatial distribution of weak earthquake centers? // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2010. – V. 1, N 4. – P. 419–440. DOI: 10.5800/GT-2010-1-4-0027. – EDN: NTLDVD
- Lienert B.R., Berg E., Frazer L.N. HYPOCENTER: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1986. – V. 76, N 3. – P. 771–783. DOI: 10.1785/BSSA0760030771
- Lienert B.R., Havskov J. A computer program for locating earthquakes both locally and globally // *Seismological Research Letters*. – 1995. – V. 66, N 5. – P. 26–36. DOI: 10.1785/gssrl.66.5.26
- Melnikova V.I., Filippova A.I., Gileva N.A. The Muyakan Earthquake Sequence in the North Muya Region of the Baikal Rift Zone: Detailed Analysis and Possible Reasons // *Pure and Applied Geophysics*. – 2022. – V. 179, N 9. – P. 3157–3175. DOI: 10.1007/s00024-022-03124-7
- Melnikova V.I., Gileva N.A., Arefev S.S., Bykova V.V. The 2008 Kultuk earthquake with $M_w=6.3$ in the South of Baikal: spatial-temporal analysis of seismic activation. // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2012. – V. 48, N 7. – P. 594–614. DOI: 10.1134/S1069351312060031. – EDN: RGLZAP
- Michele M., Chiaraluce L., Di Stefano R., Waldhauser F. Fine-scale structure of the 2016–2017 Central Italy seismic sequence from data recorded at the Italian National Network // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2020. – V. 125, N 4. – e2019JB018440. DOI: 10.1029/2019JB018440
- Shelly D.R. A high-resolution seismic catalog for the initial 2019 Ridgecrest earthquake sequence: Foreshocks, aftershocks, and faulting complexity // *Seismological Research Letters*. – 2020. – V. 91, N 4. – P. 1971–1978. – DOI: 10.1785/0220190309
- Waldhauser F. HypoDD: A program to compute double-difference hypocenter locations. – US Geological Survey. Open-File Report 01-113, 2001. – 25 p. DOI: 10.3133/OFR01113
- Waldhauser F., Schaff D.P. Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2008. – V. 113, N B8. – B08311. DOI: 10.1029/2007JB005479

Сведения об авторах

Гилёва Надежда Алексеевна, начальник отдела Байкальского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (БФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Иркутск, Россия. E-mail: nagileva@crust.irk.ru

Хритова Мария Анатольевна, канд. техн. наук, начальник сектора БФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия. E-mail: hritova@crust.irk.ru

Condition and prospects of detailed processing of earthquakes of the Baikal region and Transbaikalia

© 2023 N.A. Gileva, M.A. Khritova

BB GS RAS, Irkutsk, Russia

Received February 15, 2023

Abstract Throughout the history of the Baikal seismic network (since 1901), great efforts have been made to preserve the most detailed information about recorded seismic events. The article considers a method for detailed summary processing of earthquakes in the Baikal and Transbaikalia regions used in the BB GS RAS. The level and quality of regional processing are shown on the example of 2019. 7273 earthquakes were registered during the year, most of them are (62%) weak earthquakes ($K_p=6$), for which the error of determining the coordinates of the epicenters was on average less than 5 km. Localization accuracy of epicenters for earthquakes with a $K_p \geq 9$ is less than 2 km. The results of some studies using data from the Kultuk and Muyakan local temporary networks are presented. A comparison of the results and volumes of earthquake processing with other branches of the GS RAS is shown. Thus, the number of earthquakes in the region of the Baikal and Transbaikalia ($N=63081$) exceeds any of the other seismically active regions of Russia by at least 2.4 times for the period 2014–2017 (Altai and Sayan – $N=26458$; Kamchatka and Commander Islands – $N=26301$). According to the number of seismic stations which are used in the processing of one earthquake ($K \geq 9$) and the number of phases of seismic waves, regions of the Baikal, Transbaikalia and of the North Caucasus are leading and close to each other. There are 29 and 33 stations respectively, 87 and 68 phases. In other words, the volume of earthquake processing in the Baikal branch is much larger than in any of the branches of the GS RAS. It was concluded that currently the processing of earthquakes in the BB GS RAS is carried out in an optimal way in view to the size of the region, the number of seismic stations, the quality of communication and the number of recorded earthquakes. Reforming the system of processing seismic events in the BB GS RAS is expedient after a significant increase in the observation points in the region.

Keywords Earthquake, catalog, bulletin, detailed processing, Baikal region, Transbaikalia, Baikal rift zone.

For citation Gileva, N.A., & Khritova, M.A. (2023). [Condition and prospects of detailed processing of earthquakes of the Baikal region and Transbaikalia]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(2), 77-99. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.06>. EDN: SSNWGI

References

- Aleshina, E.I., Kurtkin, S.V., & Karpenko, L.I. (2020). [North-East Russia]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 183-191. (In Russ.). DOI: [10.35540/1818-6254.2020.23.17](https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.17). EDN: TGFVWV
- Aleshina, E.I., Kurtkin, S.V., & Karpenko, L.I. (2021). [Seismicity of the North-East of Russia in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 164-172. (In Russ.). DOI: [10.35540/1818-6254.2021.24.15](https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.15). EDN: AORKRT
- Aleshina, E.I., Kurtkin, S.V., & Karpenko, L.I. (2022). [Seismicity of the North-East of Russia in 2016-2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016-2017), 176-186. (In Russ.). DOI: [10.35540/1818-6254.2022.25.15](https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.15). EDN: XJTPYE
- Asming, V.E., Fedorov, A.V., Prokudina, A.V., & Evtyugina, Z.A. (2017). [Automatic system for monitoring of regional seismicity NSDL. Principles of construction and some application results]. In *Materialy XII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"*. Otv. red. A.A. Malovichko [Proceedings of the XII International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data". Ed. A.A. Malovichko] (pp. 33-36). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: ZPNIHB
- Asming, V.E., Gileva, N.A., & Karpinsky, V.V. (2018). [Experience of implementation of the NSDL system in Geophysical Survey of RAS]. In *Materialy XIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"*. Otv. red. A.A. Malovichko [Proceedings of the XIII International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data". Ed. A.A. Malovichko] (pp. 30-34). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: YNOGPJ

- Biulleten' Postoiannoï tsentral'noi seismicheskoi komissii. 1902. Ianvar'—Iiun'* [Bulletin of the Permanent Central Seismological Commission, 1902. January-June]. (1903). In *Izvestiia Postoiannoï tsentral'noi seismicheskoi komissii. T. 1, № 2* [Proceedings of Permanent Central Seismological Commission, Vol. 1, No. 2] (pp. 1–104). St. Petersburg, Russia: Imperial Academy of Sciences Publishing House (In Russ.).
- Chebrov, D.V., Chebrova, A.Yu., Abubakirov, I.R., Matveenko, E.A., Mityushkina, S.V., Pavlov, V.M., Saltykov, V.A., Voropaev, P.V., & Droznina, S.Ya. (2020). [Kamchatka and Commander Islands]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 172–182. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.16. EDN: ORWLTU
- Chebrov, D.V., Saltykov, V.A., Droznina, S.Ya., Romasheva, E.I., Mityushkina, S.V., Abubakirov, I.R., Pavlov, V.M., Raevskaya, A.A., & Matveenko, E.A. (2022). [Seismicity of Kamchatka and Commander Islands in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 164–175. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.14. EDN: VBTEYB
- Chebrov, D.V., Saltykov, V.A., Matveenko, E.A., Droznina, S.Ya., Romasheva, E.I., Mityushkina, S.V., Abubakirov, I.R., & Pavlov, V.M. (2021). [Seismicity of Kamchatka and Commander Islands in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 153–163. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.14. EDN: FZNZSB
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Fateev, A.V., Shevkunova, E.V., & Podkorytova, V.G. (2020). [Altai and Sayan]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 122–129. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.11. EDN: XBLRXU
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Fateev, A.V., Shevkunova, E.V., & Podkorytova, V.G. (2021). [Seismicity of the Altai and Sayan region in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 122–128. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.11. EDN: GGVHYE
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Fateev, A.V., Shevkunova, E.V., & Podkorytova, V.G. (2022). [Seismicity of the Altai and Sayan region in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 129–136. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.11. EDN: SYTVMB
- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Shevkunova, E.V., Fateev, A.V., Gladyshev, E.A., Arapov, V.V., Artemova, A.I., Podkorytova, V.G., Chechel'nitskii, V.V., Radziminovich, Y.B., & Kobeleva, E.A. (2022). The Khuvsgul earthquake of January 12, 2021 (Mw=6.7, ML=6.9) and early aftershocks. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 58(1), 59–73. DOI: 10.1134/S1069351322100019. EDN: EHDBHU
- Filippova, A.I., Bukchin, B.G., Fomochkina, A.S., Melnikova, V.I., Radziminovich, Y.B., & Gileva, N.A. (2022). Source process of the September 21, 2020 Mw 5.6 Bystraya earthquake at the south-eastern segment of the Main Sayan fault (Eastern Siberia, Russia). *Tectonophysics*, 822(4), 229162. DOI: 10.1016/j.tecto.2021.229162. EDN: DQTTPV
- Fojtková, L., Vávryčuk, V., Cipciar, A., & Madarás, J. (2010). Focal mechanisms of micro-earthquakes in the Dobrá Voda seismoactive area in the Malé Karpaty Mts. (Little Carpathians), Slovakia. *Tectonophysics*, 492(1–4), 213–229. DOI: 10.1016/j.tecto.2010.06.007. EDN: NBDQNN
- Fokina, T.A., Safonov, D.A., & Kostylev, D.V. (2022). [Seismicity of the Amur and Primorye, Sakhalin, and the Kuril-Okhotsk region in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 146–163. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.13. EDN: UCRNZJ
- Fokina, T.A., Safonov, D.A., Doroshkevich, E.N., & Kostylev, D.V. (2020a). [Kuril-Okhotsk region]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 162–171. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.15. EDN: AJORKV
- Fokina, T.A., Safonov, D.A., Kostylev, D.V., & Mikhaylov, V.I. (2020b). [Sakhalin]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 152–161. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.14. EDN: CZHVKC
- Fokina, T.A., Safonov, D.A., Kostylev, D.V., & Mikhaylov, V.I. (2021). [Seismicity of the Amur and Primorye, Sakhalin, and the Kuril-Okhotsk region in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 139–152. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.13. EDN: OHBBDR
- Gabsatarova, I.P., Koroletski, L.N., Ivanova, L.E., Saipina, A.A., Bagaeva, S.S., Adilov, Z.M., & Asmanov, O.A. (2021). [Seismicity of the North Caucasus in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 69–83. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.06. EDN: ORCRZJ
- Gabsatarova, I.P., Koroletski, L.N., Ivanova, L.E., Saipina, A.A., Bagaeva, S.S., Adilov, Z.M., & Asmanov, O.A. (2022). [Seismicity of the North Caucasus in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 74–86. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.06. EDN: QPXOME
- Gabsatarova, I.P., Koroletski, L.N., Saipina, A.A., Bagaeva, S.S., Adilov, Z.M., & Asmanov, O.A. (2020). [North Caucasus]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 68–81. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.06. EDN: TYGODF
- Gileva, N.A. (2014). [Database of seismological observations of the South Baikal region of the Baikal rift zone for 1994–2012]. Certificate RF of state registration of database No. 2014620487. (In Russ.).
- Gileva, N.A. (2015). [Database of seismological observations of the Baikal-Muya region of the Baikal rift zone for 1994–2013]. Certificate RF of state registration of database No. 2015621528. (In Russ.). EDN: ZMMKFY
- Gileva, N.A. (2017). [Database of seismological observations of the Khubsugul-Tunkinsky region of the Baikal rift zone for 1994–2014]. Certificate RF of state registration of database No. 2017620826. (In Russ.). EDN: TVWNOP
- Gileva, N.A. (2018). [Database of seismological observations of the Kodaro-Udokan region of the Baikal rift zone

- for 1994-2014]. Certificate RF of state registration of database No. 2018621034. (In Russ.). EDN: XUHYYH
- Gileva, N.A., Masalsky, O.K., & Kobeleva, E.A. (2017). [Muyakan swarm (Butyatia) epicentral area]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2015 godu* [Earthquakes in Russia in 2015] (pp. 103-107). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: ZIEVID
- Gileva, N.A., Melnikova, V.I., Filippova, A.I., Radziminovich, Ya.B., & Kobeleva, E.A. (2021). [Muyakan earthquake sequence in 2015 (Northern Baikal region)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 245-257. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.24. EDN: NCXKNJ
- Golenetskii, S.I. (1988). [Earthquakes of Cisbaikalia and Transbaikalia]. In *Zemletriaseniia v SSSR v 1985 godu* [Earthquakes in the USSR in 1985] (pp. 124-135). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Golenetskii, S.I., & Perevalova, G.I. (1984). [A program for determination of main earthquake parameters from observations at stations of the regional seismic network in Cisbaikalia]. In *Primenenie matematicheskikh metodov i EVM v geologii i geofizike: Sbornik algoritmov i program* [Application of mathematical methods and computers in geology and geophysics: collection of algorithms and programs] (pp. 35-54). Irkutsk, Russia: Available from VINITI, 03.12.1984. No. 7675. (In Russ.).
- International Seismological Centre. (2023). *IASPEI Seismic Format (ISF)*. Available at: <http://www.isc.ac.uk/standards/isf/download/isf.pdf>
- International Seismological Centre. (2023). *On-line Bulletin*. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>. DOI: 10.31905/D808B830
- Khritova, M.A. (2015). [Program for automatic processing of regional earthquakes in the Baikal and Transbaikalia AutoBykl]. Certificate RF of state registration of a computer program No. 2015661500. (In Russ.). EDN: FWNESO
- Khritova, M.A. (2017). [Program for verifying the correctness of data of six-channel seismic records “CheckAgent”]. Certificate RF of state registration of a computer program No. 2017610336. (In Russ.). EDN: SBANRM
- Khritova, M.A. (2022). [Program for generating collections of station records for earthquakes DCEvents Certificate RF of state registration of a computer program No. 2022666091. (In Russ.). EDN: OZWDFR
- Khritova, M.A., & Gileva, N.A. (2013). [Quality control system of channels digital seismic stations of Baikal Branch of the Geophysical Survey SB RAS]. In *Materialy VIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly “Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh”* [Proceedings of the VIII International Seismological Workshop “Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data”] (pp. 337-341). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: SSTOAP
- Khritova, M.A., & Gileva, N.A. (2022). [The software for processing aftershock sequences of earthquakes]. In *Materialy XVI Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly “Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh”* [Proceedings of the XVI International Seismological Workshop “Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data”] (p. 99). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: GSVIQX
- Kissling, E. (1995). *Program VELEST user's guide – Short Introduction (second draft version)*. ETH Zuerich: Institute of Geophysics Publ., 26 p.
- Kobeleva, E.A., Gileva, N.A., Khamidulina, O.A., Radziminovich, Ya.B., & Tubanov, Ts.A. (2022). [Results of seismic monitoring of various regions of Russia. Baikal and Transbaikalia]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2020 godu* [Earthquakes in Russia in 2020] (pp. 45-52). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: CLFOAC
- Kocharyan, G.G., Kishkina, S.B., & Ostapchuk A.A. (2010). Seismic picture of a fault zone. What can be gained from the analysis of fine patterns of spatial distribution of weak earthquake centers? *Geodynamics & Tectonophysics*, 1(4), 419-440. DOI: 10.5800/GT-2010-1-4-0027. EDN: NTL DVR
- Kovalenko, N.S., Fokina, T.A., Safonov, D.A., & Kostylev, D.V. (2020). [Amur and Primorye]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 140-151. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.13. EDN: ZKUUJE
- Koz'min, B.M., & Shibaev, S.V. (2020). [Yakutia]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 192-198. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.18. EDN: WPYHWP
- Lienert, B.R., & Havskov, J. (1995). A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seismological Research Letters*, 66(5), 26-36. DOI: 10.1785/gssrl.66.5.26
- Lienert, B.R., Berg, E., & Frazer, L.N. (1986). HYPOCENTER: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76(3), 771-783. DOI: 10.1785/BSSA0760030771
- Melnikova, V.I., Filippova, A.I., & Gileva, N.A. (2022). The Muyakan earthquake sequence in the north Muya region of the Baikal rift zone: Detailed analysis and possible reasons. *Pure and Applied Geophysics*, 179(9), 3157-3175. DOI: 10.1007/s00024-022-03124-7
- Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Aref'ev, S.S., & Bykova, V.V. (2012). The 2008 Kultuk earthquake with Mw=6.3 in the South of Baikal: spatial-temporal analysis of seismic activation, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 48(7), 594-614. DOI: 10.1134/S1069351312060031. EDN: RGLZAP
- Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Filippova, A.I., Radziminovich, Ya.B., & Kobeleva, E.A. (2021). [Seismicity of Baikal and Transbaikalia in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 129-138. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.12. EDN: JCDDFK
- Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Kurushin, R.A., Masalskii, O.K., & Shlaevskaya, N.S. (2003). [Identification of conditional areas for annual surveys of seismicity in the region of the Baikal region and Transbaikalia]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 1997 godu* [Earthquakes

- in Northern Eurasia, 1997] (pp. 107-117). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: VBAGBP
- Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Radziminovich, Ya.B., & Seredkina, A.I. (2014). [Kultuk earthquake on August 27, 2008 with $K_p=15.9$, $M_w=6.3$, $I_0=8-9$ (Southern Baikal)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2008 god* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2008] (pp. 386-407). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: UDUBOV
- Michele, M., Chiaraluce, L., Di Stefano, R., & Waldhauser, F. (2020). Fine-scale structure of the 2016–2017 Central Italy seismic sequence from data recorded at the Italian National Network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(4), e2019JB018440. DOI: 10.1029/2019JB018440
- SeisComp3. (2023). *Documentation for SeisComp3*. Retrieved from <https://www.seiscomp.de/seiscomp3/doc.html>
- Shelly, D.R. (2020). A high-resolution seismic catalog for the initial 2019 Ridgecrest earthquake sequence: Foreshocks, aftershocks, and faulting complexity. *Seismological Research Letters*, 91(4), 1971-1978. DOI: 10.1785/0220190309
- Shibaev, S.V., Geissler, W., Koz'min, B.M., Tuktarov, R.M., & Makarov, A.A., (2022). [Seismicity of Yakutia in 2016-2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016-2017), 187-195. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.16. EDN: XTGLLR
- Shibaev, S.V., Koz'min, B.M., & Makarov, A.A. (2021). [Seismicity of Yakutia in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 173-181. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.16. EDN: TMGQEE
- USGS. Software. (2023). *HYPONVERSE Earthquake Location*. Retrieved from <https://www.usgs.gov/software/hypoinverse-earthquake-location>
- Voznesenskii, A.V. (1902). *Spisok zemletryasenyi po nablyudenyam Irkutskoy magnitno-meteorologicheskoy observatorii. № 1* [List of earthquakes according to the observations of Irkutsk magnetic-meteorological observatory. N 1]. Irkutsk, Russia: P.I. Makushin Publishing House, 22 p. (In Russ.).
- Waldhauser, F. (2001). HypoDD: A program to compute double-difference hypocenter locations. *US Geological Survey, Open-File Report 01-113*, 25 p. DOI: 10.3133/OFR01113
- Waldhauser, F., & Schaff, D.P. Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8), B08311. DOI: 10.1029/2007JB005479
- Zemletriaseniia Rossii v 2020 godu* [Earthquakes in Russia in 2020]. (2022). Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 204 p. (In Russ.). EDN: ZZOKKG

Information about authors

Gileva Nadezhda Alekseevna, Head of Department of the Baikal Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (BB GS RAS), Irkutsk, Russia. E-mail: nagileva@crust.irk.ru

Khritova Mariya Anatolyevna, PhD, Head of Sector of the BB GS RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: hritova@crust.irk.ru