

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ МОРСКОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Костылев Дмитрий Викторович

**Программно-аппаратный комплекс автоматизированного сбора,
хранения и обработки сейсмологических данных и его применение
в изучении природной и наведённой сейсмичности острова
Сахалин**

1.6.9. Геофизика (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Еманов Александр Федорович

Южно-Сахалинск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ.....	10
1.1 Региональный и национальный уровни мониторинга.....	12
1.2 Локальный уровень мониторинга.....	13
1.3 Двухуровневый мониторинг.....	20
1.4 Зарубежный опыт проектирования и создания локальных сетей мониторинга наведенной сейсмичности.....	26
Выводы по главе 1.....	32
ГЛАВА 2. ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО РАЙОНА О. САХАЛИН.....	33
2.1 Район исследования.....	33
2.2 Особенности сейсмического процесса Углегорского землетрясения 13.09.2020 г. (ML=4.8)	39
2.2.1. Макросейсмические проявления Углегорского землетрясения 13 сентября 2020 г.....	41
2.2.2. Афтершоковый процесс.....	45
2.2.3. Приуроченность эпицентров к карьерам и оценка влияния на сейсмичность.....	48
2.3 Методы и результаты исследования динамики изменения сейсмичности района угледобычи	50
Выводы по главе 2.....	60
ГЛАВА 3. ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ СБОРА СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В САХАЛИНСКОМ ФИЛИАЛЕ ФИЦ ЕГС РАН.....	61
3.1. Основные этапы создания и развития сети сейсмического мониторинга Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН.....	61
3.2. Интеграция компонентов сети сейсмического мониторинга Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН на основе единой системы сбора данных.....	66
3.3. Развитие концепции автономного пункта инструментальных наблюдений.....	68
3.4. Эксплуатация станций локальных и временных сейсмических сетей.....	70
Выводы по главе 3.....	72

ГЛАВА 4. СОЗДАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ МОНИТОРИНГА РАЙОНА СОЛНЦЕВСКОГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЁ РАБОТЫ.....	73
4.1 Состояние сети мониторинга СФ ФИЦ ЕГС РАН на о. Сахалин.....	73
4.2 Сеть сейсмического мониторинга СУР. Этапы развития. Аппаратное и программное обеспечение.....	74
4.3 Результаты полученные в 2021-2023 годах с использованием данных локальной сети сейсмического мониторинга района СУР	88
4.3.1 Регистрация промышленных взрывов и землетрясений в районе СУР.....	88
4.3.2 Совместное использование данных региональных сетей ФИЦ ЕГС РАН и локальной сети.....	91
4.3.3. Использование станций локальной сети при регистрации оползневых процессов на отвалах карьера и оценки сейсмического воздействия на их устойчивость.....	94
4.3.4.Использование локальной сети для контроля сейсмического воздействия промышленных взрывов.....	100
Выводы по главе 4.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Три самых разрушительных землетрясения за последние 30 лет на о. Сахалин (Нефтегорское 1995 г. с магнитудой $M=7.2$ на северо-востоке острова, Углегорское 2000 г., $M=7.0$ в центральной его части, и Невельское 2007 г., $M=6.2$ на юге) указали на более высокий уровень сейсмической опасности Сахалинской области, чем это было предусмотрено в картах по общему сейсмическому районированию (8-9 баллов по шкале MSK-64 при $T=500$ лет). Данными событиями было инициировано развитие сети сейсмических станций на о. Сахалин и организация полноценной сейсмологической службы в начале 2000-х годов. В 2015 году сеть Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы Российской академии наук (СФ ФИЦ ЕГС РАН) стала полностью цифровой, а каталоги землетрясений получили высокую представительность за счет плотной сети (особенно на юге острова). Таким образом, в целом, на о. Сахалин была решена задача проведения мониторинга природной сейсмичности на региональном уровне. Однако, во многих исследованиях [Адушкин, Турунтаев, 2015] показано, что одним из проявлений антропогенного воздействия на земную кору считается наведенная сейсмичность – землетрясения, так или иначе связанные с инженерной деятельностью. Системы сейсмологического мониторинга наведенной сейсмичности в районах добычи полезных ископаемых СФ ФИЦ ЕГС РАН на сегодняшний день не имеет, хотя такая система позволила бы обнаруживать возникновение сейсмических активизаций.

В Углегорском районе Сахалинской области длительная и интенсивная разработка полезных ископаемых продолжается на протяжении 90 лет. В настоящее время добыча угля в районе ведется открытым способом на нескольких участках. Наиболее активная добыча осуществляется на Солнцевском угольном разрезе (СУР) Восточной горнорудной компании. За последние годы произошло резкое увеличение масштабов добычи угля и количества сопровождающих их взрывов, что позволяет предположить влияние техногенной деятельности на активизацию сейсмичности. Активная разработка недр на небольшой площади делает особо важным проведение детального мониторинга данного участка, для чего необходимо

размещение дополнительных станций сейсмического мониторинга с их интеграцией в региональную сеть.

Степень разработанности

Согласно Постановлением Правительства Российской Федерации № 444 от 11 мая 1993 г. «О федеральной системе сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений» и № 1346 от 25 декабря 1993 г. «Об утверждении Положения о федеральной системе сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений» Федеральная сеть сейсмологических наблюдений (ФССН) является системой непрерывного сейсмического мониторинга, предоставляющей информацию о произошедших землетрясениях на территории России, сопредельных ей территорий Евразии и мира в целом, и обеспечивающей решение задач по защите населения от чрезвычайных ситуаций, прогноза места и времени катастрофических сейсмических событий. Основным элементом ФССН являются сейсмические станции. Неоднородность распределения сейсмически активных зон в стране обуславливает необходимость использования трех уровней наблюдений: телесеismicкого, регионального и локального [Старовойт, 1994]. Региональные сети располагаются в пределах сейсмоактивных регионов и должны регистрировать все землетрясения, начиная с магнитуд 1.5-2.0 в пределах контролируемой области. Локальные сети предназначены для мониторинга сейсмических процессов, происходящих в пределах отдельных ответственных объектов (шахты, рудники, карьеры, дамбы и т.п.) и на прилегающей к ним территории радиусом до 5 км, обеспечивая регистрацию всех сейсмических событий, начиная с магнитуды 0.0-0.5. Для локального уровня мониторинга, как предпочтительного при решении задач исследования наведенной сейсмичности, преимущество имеют локальные сети, размещенные непосредственно вблизи объекта исследования, которые используются для решения как научных, так и практических проблем, связанных с производственными процессами на объектах угледобывающей промышленности. Лучшие примеры создания сейсмологических сетей контроля наведенной сейсмичности предусматривают создание систем двухуровневого мониторинга на основе сочетания локальных и региональных сетей [Сейсмологический мониторинг..., 2019].

Цель и задачи исследования

Основная цель исследований – создание автоматизированной системы контроля за природной и техногенной сейсмичностью острова Сахалин.

В соответствии с этим решались следующие **задачи**:

1. Сформировать единую систему сбора сейсмологических данных, объединяющей все сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН с унификацией сейсмологических данных в едином формате, включающую в себя созданную систему мониторинга на локальном уровне в районе Солнцевского угольного разреза.

2. Подтвердить изменение характера сейсмичности района угледобычи в Углегорском районе Сахалинской области (Солнцевский угольный разрез) от естественной к смешанной природно-техногенной.

3. Выполнить анализ данных, полученных в 2021-2023 гг. с использованием локальной сети сейсмического мониторинга района Солнцевского угольного разреза по разным аспектам для оценки применимости сети как инструмента для мониторинга геофизических процессов в районе разработок полезных ископаемых.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые для о. Сахалин предложены и реализованы программно-аппаратные решения построения единого информационного поля сейсмических данных на основе сейсмических сетей различных платформ и систем сбора данных, а также разработана концепция создания унифицированного автоматизированного пункта инструментальных сейсмологических наблюдений на базе современного оборудования.

Создана единая система сбора, обработки и хранения сейсмологических данных, не имеющая до этого времени аналогов в Сахалинской области. В результате проведенных комплексных исследований изучения динамики изменения сейсмичности района активной добычи полезных ископаемых на острове Сахалин с использованием созданной системы мониторинга, показан переход от естественной сейсмичности к смешанной природно-техногенной.

Практическая значимость

Создана автоматизированная система сбора и обработки сейсмических данных для контроля за природной и техногенной сейсмичностью на острове Сахалин. В результате интеграции различных источников сейсмологических данных в единую систему сбора, обработки и хранения данных с использованием современных программно-аппаратных решений, значительно повысилась точность определения эпицентров и взрывов, а также появилась возможность проводить расчеты по определению типов механизмов очагов землетрясений для более детального понимания причин их возникновения и возможных воздействий на объекты инфраструктуры региона. Совместное использование данных станций региональной и созданной локальной сети позволило проводить регистрацию оползневых процессов на отвалах карьера и выполнять оценку их устойчивости, а также вести контроль сейсмического воздействия промышленных взрывов.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач выбраны программно-аппаратные и технологические решения для построения системы сбора, обработки и хранения сейсмологических данных, в соответствии с концепцией единого поля информационных данных, включающие в себя: серверные и коммуникационные подсистемы (каналы связи-передачи данных, протоколы

передачи данных, операционные системы, программное обеспечение), а также средства предоставления и отображения данных.

Обработка и анализ полученной информации осуществлялись с использованием протестированных и зарегистрированных программ, признанных мировым научным сообществом современных методов цифровой обработки данных, таких как:

программный комплекс DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010], в качестве основной системы обработки;

программный пакет для анализа сейсмичности ZMAP [Wiemer, 2001] для работы с каталогами землетрясений и выполнения декластеризации афтершоковых последовательностей;

вычислительный модуль FOCMEC комплекса сейсмологических программ SEISAN [Ottmöller et al., 2011] для расчета и отображения фокальных механизмов;

программный продукт IRIS DMC Noise Toolkit [Noise Toolkit ...] для вычисления спектральной плотности мощности (PSD) данных сигнала станции;

программа расчета регистрационных возможностей сейсмических сетей и групп SARra [Дягилев, 2020];

приложения компаний Nanometrics, GeoSIG и Guralp для настройки сейсмического оборудования, сбора данных и контроля состояния аппаратуры;

также в работе были использованы возможности современных геоинформационных систем.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Реализованная комплексная автоматизированная система мониторинга природной и техногенной сейсмичности острова Сахалин, включающая региональную и локальную сеть, интегрирована в единую систему сбора, обработки и хранения информации СФ ФИЦ ЕГС РАН на аппаратном и программном уровне в общем информационном поле данных.

2. Созданная двухуровневая система мониторинга позволяет проводить регистрацию сейсмических событий в районе Солнцевского угольного разреза с магнитудой M_L от 0.2, а также дает возможность контролировать влияние буровзрывных работ, проводимых на разрезе, на геосреду района.

3. Анализ материала, полученного с использованием созданной системы мониторинга, позволяет предполагать наличие перехода к природно-техногенной природе сейсмичности в районе добычи полезных ископаемых.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждается, прежде всего, интеграцией созданной локальной сети сейсмического мониторинга СУР в единую систему сбора СФ ФИЦ ЕГС РАН в составе Федеральной сети сейсмологических наблюдений (ФССН). Использованные для построения сети программно-аппаратные решения полностью

соответствуют стандартам и форматам, применяемым в мировых системах обмена сейсмологическими данными.

Работа выполнена в соответствии с научными темами и планами ИМГиГ ДВО РАН по государственному заданию (ответственный исполнитель).

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, были представлены на международных и всероссийских научных мероприятиях:

1. IX, XI, XII, XIII, XV, XVII международные сейсмологические школы (2014, 2016, 2017, 2018, 2021, 2023);
2. X, XI, XIII международные конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, Камчатский край (2019, 2020, 2023);
3. III и IV международные научные конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы», г. Южно-Сахалинск (2019, 2021);
4. V и VI международные конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» г. Москва (2019, 2022);
5. 22-й международная конференция и выставка "Нефть и газ Сахалина-2018» (2018, г. Южно-Сахалинск);
6. 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes (JKASP-2018) (2018, г. Петропавловск-Камчатский);
7. VI, VII, IX научно-технические конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», г. Петропавловск-Камчатский (2017, 2019, 2023).

Результаты представлены на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска.

Личный вклад

Автор принимал непосредственное участие в формировании и развитии региональной сети и системы сбора и обработки сейсмологических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН, а также в разработке концепции построения Автономных пунктов инструментальных наблюдений (АПИИ). Автором проделан весь цикл работ по созданию локальной сети мониторинга района СУР: от выбора мест размещения АПИИ до интеграции получаемых данных в единую систему сбора сейсмологической информации в СФ ФИЦ ЕГС РАН. Автором проведена адаптация и настройка всех аппаратных и программных компонент созданной сети. С использованием специализированного программного обеспечения для работы с каталогами автором проведены расчеты по исследованию сейсмичности района СУР. Автор принимал личное участие в работах в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения 2020 года и проведении макросейсмических обследований.

Автор самостоятельно и вместе с соавторами участвовал в подготовке научно-технических отчётов и публикаций по теме диссертационной работы, в обобщении материалов и формулировке выводов. В работах, опубликованных в соавторстве, вклад соискателя состоит в разработке и описании процессов создания и эксплуатации сейсмических сетей и оборудования, а также в подготовке общего текста публикаций к выходу в научных журналах. В публикациях, где соискатель представлен первым автором, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 статьях в рецензируемых научных журналах, из них три в изданиях, рекомендованных для защиты в МГУ. По теме диссертации опубликовано 18 статей в сборниках материалов всероссийских и международных конференций. Каталог промышленных взрывов СУР представлен в репозитории Международного сейсмологического центра (ISC).

Благодарности

Автор выражает признательность и благодарность научному руководителю д.т.н. Еманову А.Ф. за постановку темы работы и общее руководство исследованиями на всех этапах. Искренне благодарю коллег из Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН Сергеева В.А. и Дроздина Д.В. за сотрудничество на этапе формирования систем сбора и обработки данных. Автор особо благодарен Костылевой Н.В. - соавтору публикаций, в сотрудничестве с которой были получены важные научные результаты. Благодарю сотрудников сейсмической станции «Углегорск» и коллег из ИМГиГ ДВО РАН за поддержку и помощь в организации сети локального мониторинга.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

Одним из проявлений антропогенного воздействия на земную кору считается наведенная сейсмичность – землетрясения, так или иначе связанные с инженерной деятельностью. Во многих исследованиях [Николаев, 1994; Адушкин, Турунтаев, 2015; Adushkin, 2016; 2018; Mining-induced...2013; The technogenic...2017; Seismic Impact...2019; Simultaneous Impact...2018; Monitoring of...2020; On the genesis...2019] доказано существование наведённой сейсмичности около горнодобывающих предприятий и отсутствие однозначной связи с тектоническими структурами [Activity stages...2013].

В основном землетрясения подобного рода достаточно слабые, но магнитуда отдельных событий может достигать значительных величин. Землетрясения, ассоциированные с выемкой породы в карьерах, относятся к категории довольно редких проявлений техногенной сейсмичности. Тем не менее, самое крупное сейсмическое событие, инициированное горными работами, связано, именно с добычей угля открытым способом. Это землетрясение с магнитудой $M_L=6.1$ произошедшее 18.06.2013 г. в Кузбассе, в непосредственной близости около окрестности Бачатского угольного разреза. Интенсивность колебаний в эпицентральной зоне землетрясения составила 7 баллов [Mining-induced...2013; The technogenic...2017].

Наиболее полная база данных проявлений антропогенной сейсмичности была составлена [The human-induced...2017]. По состоянию на 2022 год база включает в себя 1239 событий, 25% этих событий определяются, как землетрясения индуцированные разработками, связанными с добычей твердых полезных ископаемых. 16 событий в базе относятся именно к открытым разработкам на карьерах, крупнейшим из которых так же указывается Бачатское землетрясение [Global review...2018].

Как известно [On the genesis...2019], основными факторами, с которым связывают инициирование землетрясений, являются регулярное воздействие на горный массив промышленных взрывов с суммарным весом заряда в сотни тонн и изменение рельефа открытыми горными выработками, включая собственно разрезы в виде углублений в рельефе и отвалы в виде искусственно насыпанных холмов. Следует отметить, что отвалы – искусственно созданные грунтовые массивы – оказывают сильное локальное воздействие на земную кору. Ответная сейсмическая активизация с учетом малых глубин очагов (первые километры) и

приуроченности к району может интерпретироваться как наведенная сейсмичность. Фактически мы имеем дело с последствием реакции земных недр на техногенное воздействие в виде перемещения горных масс.

При этом обычно основная часть мелких сейсмических событий приурочена непосредственно к месту ведения горных работ и приходится на то время, когда производятся массовые взрывы на угольных разрезах, или через 1-3 часа после них [Yakovlev, 2013]. Еще один критерий – глубина техногенных землетрясений. Выявлено, что мелкие землетрясения концентрируются под центральной частью разреза, а наиболее крупные — около бортов, при этом глубина очагов составляет 3-4 км [Mining-induced....2013]. Таким образом, добыча угля создает сильнейшее техногенное воздействие на земную кору и как следствие запускает масштабный процесс развития наведенной сейсмичности [Еманов А.Ф. и др., 2009; Адушкин, Турунтаев, 2015], исследование которой в настоящее время является одной из важнейших задач прикладной и фундаментальной сейсмологии.

Отмечается [Раннее обнаружение...2017a], что слабая наведенная сейсмичность может быть индикатором начала геодинамических процессов, приводящих к событиям с ощутимым макросейсмическим эффектом и значительным материальным уроном. К сожалению, исследование наведенной сейсмичности обычно начинается уже после ощутимых техногенных землетрясений. Контроль же за воздействием мелкофокусных слабых техногенных сейсмических событий зачастую остается без внимания со стороны сейсмологических центров. При этом, такая сейсмичность проявляется не только в виде макросейсмических эффектов, но и, в случае разработок открытых карьеров, в снижении устойчивости бортов карьеров и в активизации опасных склоновых процессов в непосредственной близости от эпицентра.

Поэтому очевидна важность мониторинга сейсмического режима районов с активными разработками полезных ископаемых вообще и открытым способом, в частности, особенно для определения возможной активизации сейсмических событий с минимальным порогом обнаружения.

1.1. Региональный и национальный уровни мониторинга

На первичном этапе решение этих задач возможно сейсмическими сетями регионального уровня, поскольку для опорных региональных станций, в том числе, предъявляются требования возможности распознавания природы сейсмических событий по особенностям записей и спектров и, как следствие, - идентификации техногенных событий и тектонических землетрясений. Для этого исследуются спектральные особенности колебаний событий различной природы, вырабатываются дискриминантные признаки распознавания взрывов и землетрясений [Адушкин, Маловичко, 2013].

В частности, использование данных станций региональной сети для создания методики идентификации взрывной сейсмичности, выработанной на основе анализа структуры волновых форм промышленных взрывов из карьеров Архангельской области [Морозов, 2008] основано на волновых формах записей станций, расположенных на расстоянии до 361 км от карьеров. Безусловно, что выполнение указанной задачи в этом случае затруднялось наличием большого числа структурных нарушений на пути сейсмических сигналов (рисунок 1.1, справа).

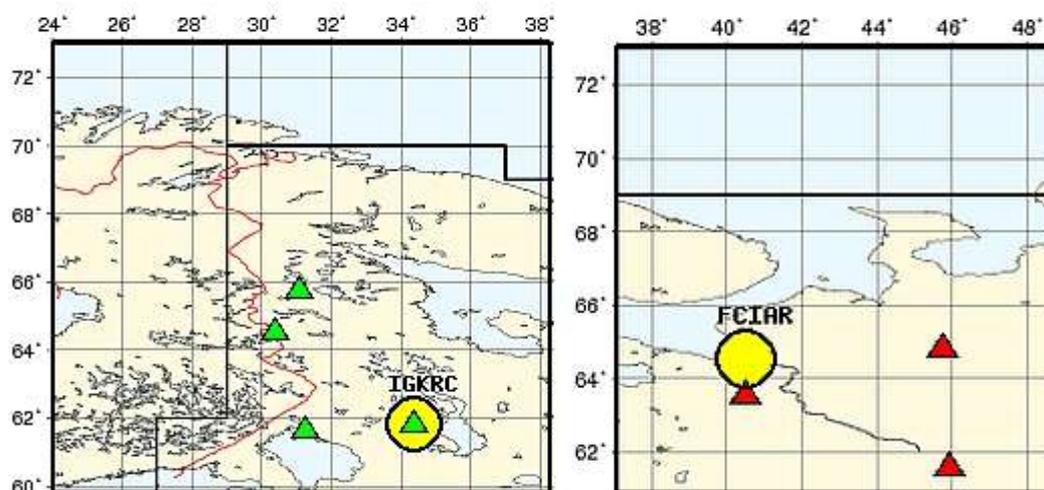


Рисунок 1.1. Сейсмологические сети Республики Карелия (слева) и Архангельской области (справа)

Важность проблемы разбраковки событий отмечается и для мониторинга особенностей взрывной сейсмичности на территории Республики Карелия [Зуева, 2019]. Для идентификации техногенных событий на сейсмических записях применяется спектральный анализ, однако, удаленность станций от действующих карьеров и незначительное количество станций региональной сети делают решение этой задачи достаточно сложной. Для решения задачи привлекаются данные сейсмических служб Финляндии и Норвегии, но существующие в

соседних регионах и странах сейсмологические сети не позволяют детально оценить сейсмическую обстановку в Карелии по причине удаленности от эпицентров событий (рисунок 1.1, слева) [Зуева, 2022].

Использование данных сетей национального уровня с широкополосной аппаратурой, позволяет достаточно устойчиво идентифицировать взрывы, однако, в случаях, когда взрывы и землетрясения близки по местоположению, возникает актуальность повышения точности идентификации природы регистрируемых событий, особенно с учетом активности взрывных работ, что требует развертывания станций вблизи районов добычи полезных ископаемых, что отмечается в результате анализа результатов регистрации взрывов на территории Казахстана станциями сети Республиканского государственного предприятия «Институт геофизических исследований» Министерства энергетики Республики Казахстан [Мукамбаев, Михайлова, 2017].

Частично эта проблема решается объединением в системе сбора данных станций региональных сетей различных научных Институтов. Так, сейсмический мониторинг карьерных взрывов на локальном участке Центрального Кумторского месторождения (Киргизская Республика) осуществляется по данным цифровых сейсмических станций сетей KRNET (Kyrgyzstan Telemetered Network) и KNET (Kyrgyz Republic Digital Network), а также станции «Тарагай» (TARG) ЦентральноАзиатского института прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ), расположенной в 40 км от исследуемого карьера [Омурбек кызы, Омуралиев, 2020].

1.2. Локальный уровень мониторинга

Как было показано, распознавание слабой техногенной сейсмичности и точная регистрация взрывных работ региональной сетью станций возможны лишь частично. Использование данных плотных локальных сетей сейсмологических станций даёт гораздо более полную информацию о наведенной сейсмичности [Система мониторинга...2015а].

Построение таких сетей традиционно организуется следующими основными способами [Раннее обнаружение...2017а]:

1. создание объектовой сети сейсмологического мониторинга;
2. установка одной или нескольких сейсмических антенн;
3. развертывание сети сейсмологических наблюдений в районе горных работ.

Ниже будут рассмотрены достоинства и недостатки перечисленных вариантов, с более подробной детализацией топологии развертывания и примеров используемого оборудования

для вторых двух методов, как наиболее пригодных для проведения мониторинга именно вблизи расположения участков с открытой разработкой полезных ископаемых.

Объектовая сеть:

Данный вид мониторинга чаще всего используется при сейсмическом контроле полей шахт и рудников. В этом случае сейсмические датчики устанавливаются не только на поверхности, но и в горных выработках, поскольку при этом необходимо регистрировать очень слабые события, в том числе с отрицательной магнитудой, а техногенный шум, распространяемый поверхностными волнами, практически не воздействует на сейсмоприемники, размещенные на большой глубине. Наиболее известны системы мониторинга шахт и рудников на территории Среднего Урала [Мониторинг сейсмических... 2013; Маловичко и др., 2008; Четырехуровневая система...2011].

Малоапертурные сейсмические группы:

Малоапертурные сейсмические группы (также часто называемые малоапертурными сейсмическими антеннами (МСА) достаточно широко используются для локации сравнительно слабых сейсмических событий (землетрясений и взрывов) на региональных расстояниях. Основное отличие сейсмической группы от сеймостанции с одним пунктом наблюдения заключается в повышении чувствительности благодаря улучшению отношения сигнал/шум. Данный эффект обеспечивается когерентным суммированием сигналов от группы сейсмоприемников методом регулируемого направленного приема [Развитие малоапертурной... 2017б]. Для этого малоапертурная сейсмическая группа (минимальное число станций в группе — четыре, чаще от семи и выше) разворачивается, как правило, на площади размером приблизительно 1 км² или более. В этих границах сейсмические волны всё ещё сохраняют когерентность, а микросейсмический шум оказывается некоррелированным.

Ярким примером использования малоапертурной сейсмической группы в целях регистрации слабой (в том числе и техногенной) сейсмичности и промышленных взрывов является малоапертурная сейсмическая группа Института динамики геосфер РАН (ИДГ РАН) «Михнево», установленная в 2004 году для мониторинга геодинамической активности Восточно-Европейской платформы (ВЕП) в 80 км от Москвы [Санина и др., 2009], имеющая конфигурацию из трех концентрических окружностей с максимальным диаметром 1.2 км. Аппаратная часть МСА «Михнево» состоит из центрального широкополосного сейсмоприемника (Streckeisen STS-2), установленного в штольне на глубине около 20 м, и 12 пунктов наблюдения с 10-ю вертикальными и 2-мя трехкомпонентными пунктами наблюдения (рисунок 1.2), оснащенных сейсмическими датчиками СМЗ-КВ с полосой пропускания 0.5–40 Гц [Адушкин и др., 2016].

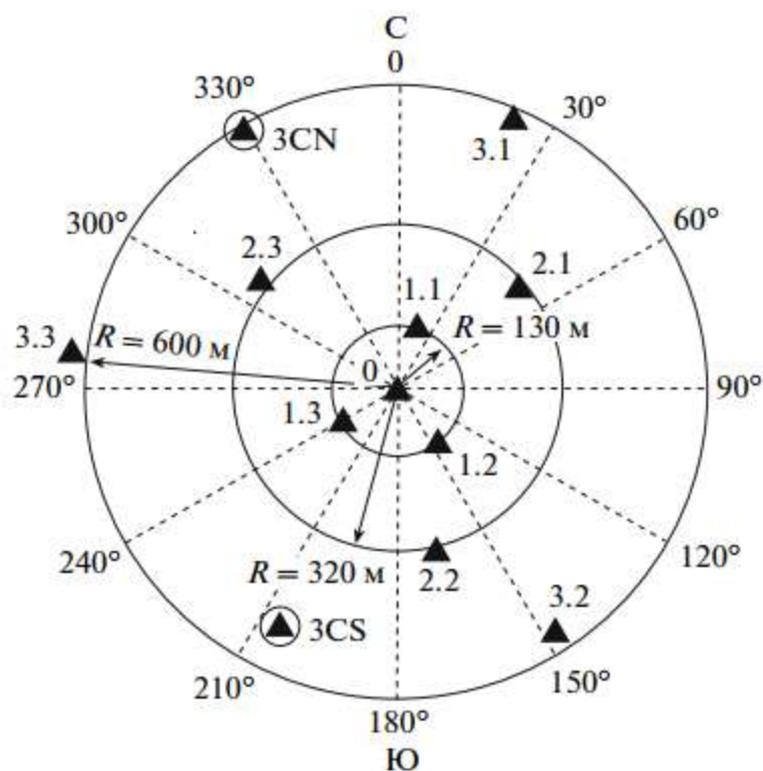


Рисунок 1.2. Конфигурация антенны «Михнево». Трехкомпонентные датчики выделены кружочками. Точка 0 – шахта [Адушкин и др., 2016]

Основной задачей МСА «Михнево» является регистрация слабых событий с $M < 2$. За год регистрируется более 4000 событий различной природы. Основная масса регистрируемых и лоцируемых событий приходится на взрывы, производимые на более чем шестидесяти карьерах, расположенных в центральной части ВЕП. [Санина и др., 2009; Санина, Константиновская, 2022]. Ещё одна наиболее известных в Российской Федерации МСА – «Апатитский ARRAY» также использовалась для выработки критериев дискриминации взрывов и землетрясений [Асминг и др., 2010]. Малоапертурная сейсмическая группа «Апатитский ARRAY» (AP0), установленная в 18 км от Апатитов (рис. 1) начала работать в 1992 году. В состав группы были включены 9 вертикальных короткопериодных сейсмометров (апертура около 1 км), расположенных по двум concentric окружностям и трехкомпонентная станция в их центре [Асминг и др., 1996]. На основании анализа записей волновых форм был выработан алгоритм распознавания сейсмических событий, включающий несколько ключевых позиций идентификации взрывов и землетрясений на действующих рудниках. Это дало возможность, в том числе, удалить из перечня землетрясений более 3500 сейсмических событий, идентифицированных как обрушение пород.

В качестве ещё одной малоапертурной сейсмической группы, предназначенной для улучшения регистрации слабых сейсмических событий на территориях с высоким уровнем

техногенного воздействия на недра, нужно упомянуть сейсмическую группу «Екимята», работавшую в районе Пермской градопромышленной агломерации с 2006 по 2018 годы. Группа состояла из семи пунктов наблюдения: центральный является трехкомпонентным, остальные – с одной вертикальной компонентой (рисунок 1.3). В качестве сейсмоприемников были использованы СМ-3-КВ с частотным диапазоном от 0 до 30 Гц [Маловичко и др., 2006].

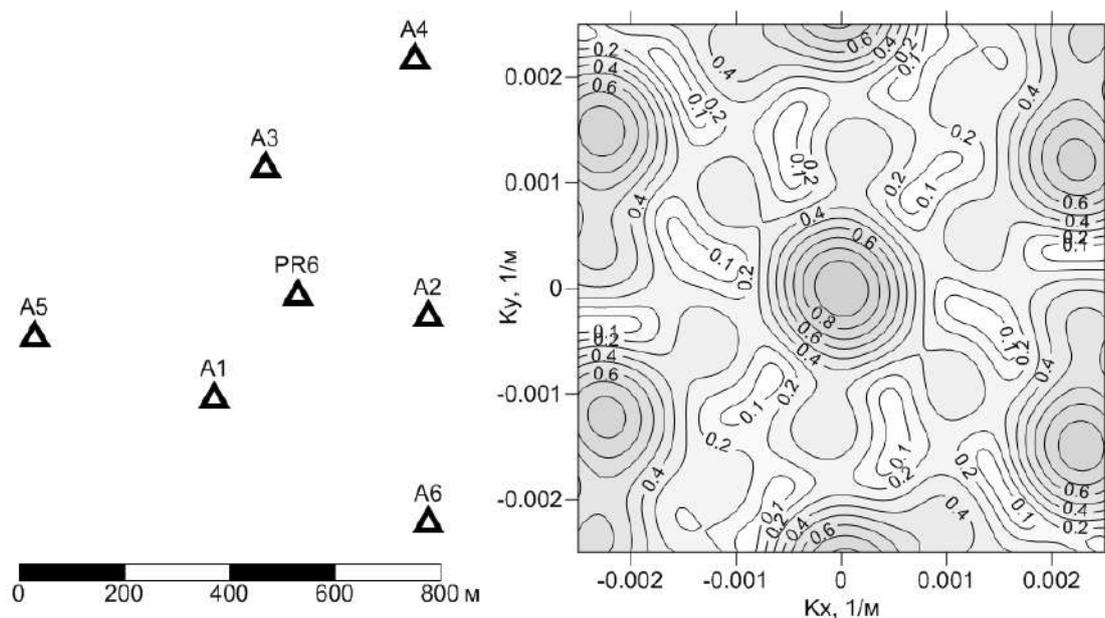


Рисунок 1.3. Пространственная конфигурация сейсмической группы из 7 пунктов наблюдения (слева) и ее передаточная функция (справа) [Маловичко и др., 2006]

В связи со сложностью поддержания инфраструктуры, в 2018 году сейсмическая группа «Екимята» была преобразована в региональную сейсмическую станцию [Габсатарова и др., 2020].

Сейсмологическая сеть в районе горных работ:

Данный вид мониторинга обычно применяется для контроля одного или нескольких масштабных объектов горнодобывающей индустрии, в том числе угольных карьеров. Состав сейсмологической сети, в этом случае, включает в себя до нескольких десятков станций, расстановка которых выполняется по принципу окружения объектов мониторинга. Как правило, предусматривается передача информации в центр обработки данных в реальном масштабе времени по сетям сотовой связи. Одним из главных преимуществ сейсмологических сетей является возможность определения координат и глубины гипоцентров событий наведенной сейсмичности с достаточно высокой точностью. Сейсмологические сети такого типа могут быть использованы не только для поиска наведенной сейсмичности, но и для

контроля времени и мощности взрывных работ, а также оценки интенсивности сотрясений в местах установки станций сети. Некоторая удаленность (до нескольких десятков километров) от непосредственных источников наведенной сейсмичности (например, карьеров) ограничивает порог минимальной регистрируемой магнитуды, но эта проблема, при необходимости, решается путем установки временных дополнительных станций вблизи исследуемого объекта.

Нередко, сети, размещенные непосредственно вблизи объекта исследования, используются для решения как научных, так и практических проблем, связанных с производственными процессами на объектах угледобывающей промышленности. В качестве примера, можно рассмотреть мониторинг сейсмического воздействия промышленных взрывов на карьере «Шахтау» (Башкортостан) в 2016-2017 годах [Верхоланцев А.В. и др., 2019]. Для постоянного контроля уровня сейсмического воздействия на территории соседних с карьером населенных пунктов было установлено несколько стационарных сейсмических станций на базе трехкомпонентных геофонов с широким динамическим диапазоном MTSS-1003 и регистраторов «Байкал-8». Общая схема расположения пунктов наблюдения приведена на рисунке 1.4.

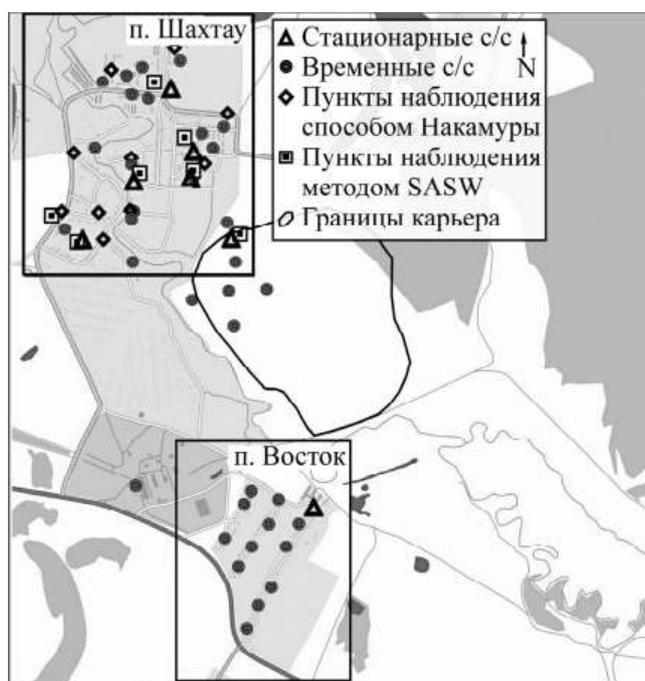


Рисунок 1.4. Схема расположения пунктов наблюдения в районе карьера «Шахтау» [Верхоланцев А.В. и др., 2019]

Кроме наблюдений с использованием стационарных станций, часть измерений проводилась во временных пунктах с таким же оборудованием. В результате инструментальных наблюдений за взрывными работами, проводимыми на карьере, были определены основные

параметры буровзрывных работ и факторы, влияющие на интенсивность сейсмического воздействия от взрывов.

Для решения задач мониторинга на локальном уровне также успешно используются сети с расположением станций до ста километров от источников техногенного воздействия на недра. В качестве примера одной из старейших сетей подобного типа, можно назвать сеть Саратовского геодинамического полигона, уровень исследований которой, в соответствии с понятиями локальной сейсмичности, определяется радиусом примерно 200 км от центра полигона. Расстояние карьеров на территории Саратовской области от сейсмических станций полигона составляет 17-82 км. Сейсмическая сеть полигона включает в себя семь станций, оборудованных короткопериодными сейсмометрами СК-1П [Огаджанов В.А. и др., 2009]. Данная конфигурация сети позволяет успешно проводить регистрацию и составлять каталоги взрывов Саратовской области [Огаджанов А.В., Маслова, 2017].

Достаточность размещения станций на территории исследований на расстоянии не более 50-60 км друг от друга для обеспечения требуемого уровня чувствительности и надежности наблюдений подтверждается, в том числе, анализом работы сети сейсмических станций Оренбургского научного центра УрО РАН [Влацкий и др., 2017]. Сейсмологическая сеть центра состоит из 8 стационарных и двух мобильных временных сейсмических станций. Временные сейсмические станции используются для исследования локальной сейсмической активности на участках с повышенной сейсмической активностью или имеются техногенные и инженерные объекты, требующие дополнительных сейсмологических исследований. Расположение сейсмических станций, а также регистрационные возможности сейсмологической сети представлены на рисунке 1.5.

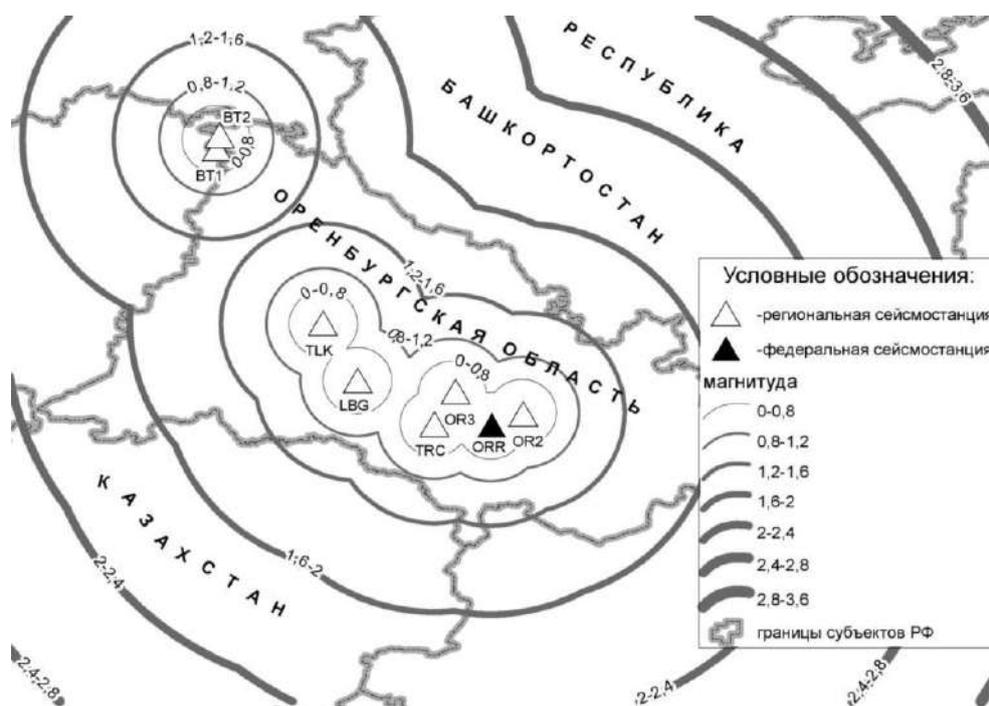


Рисунок 1.5. Размещение станций сейсмологической сети Оренбургского научного центра УрО РАН [Влацкий и др., 2017]

В некоторых случаях, в качестве сетей мониторинга для обработки записей промышленных взрывов и землетрясений, зафиксированных на локальных расстояниях, можно использовать данные и региональных сетей. Например, для спектрального анализа событий вблизи Восточно-Бейского угольного разреза (республика Хакасия, Россия) использовались записи региональной сети сейсмических станций Красноярского научно-исследовательского института геологии и минерального сырья (КНИИГиМС). В частности, анализировались сейсмические записи станций Табат (ТВТР) и Большая Речка (BLRR), оснащенных регистраторами «Байкал» и сейсмоприемниками СМЗ-КВ. Такая возможность была обусловлена расположением эпицентральных расстояний исследуемых землетрясений и взрывов в пределах 52 -72 км (землетрясения) и 59 - 77 км (взрывы) относительно станции Большая Речка и в пределах 70 - 87 км (землетрясения) и 61 - 78 (взрывы) относительно станции Табат (рисунок 1.6) [Добрынина, Герман, 2016].

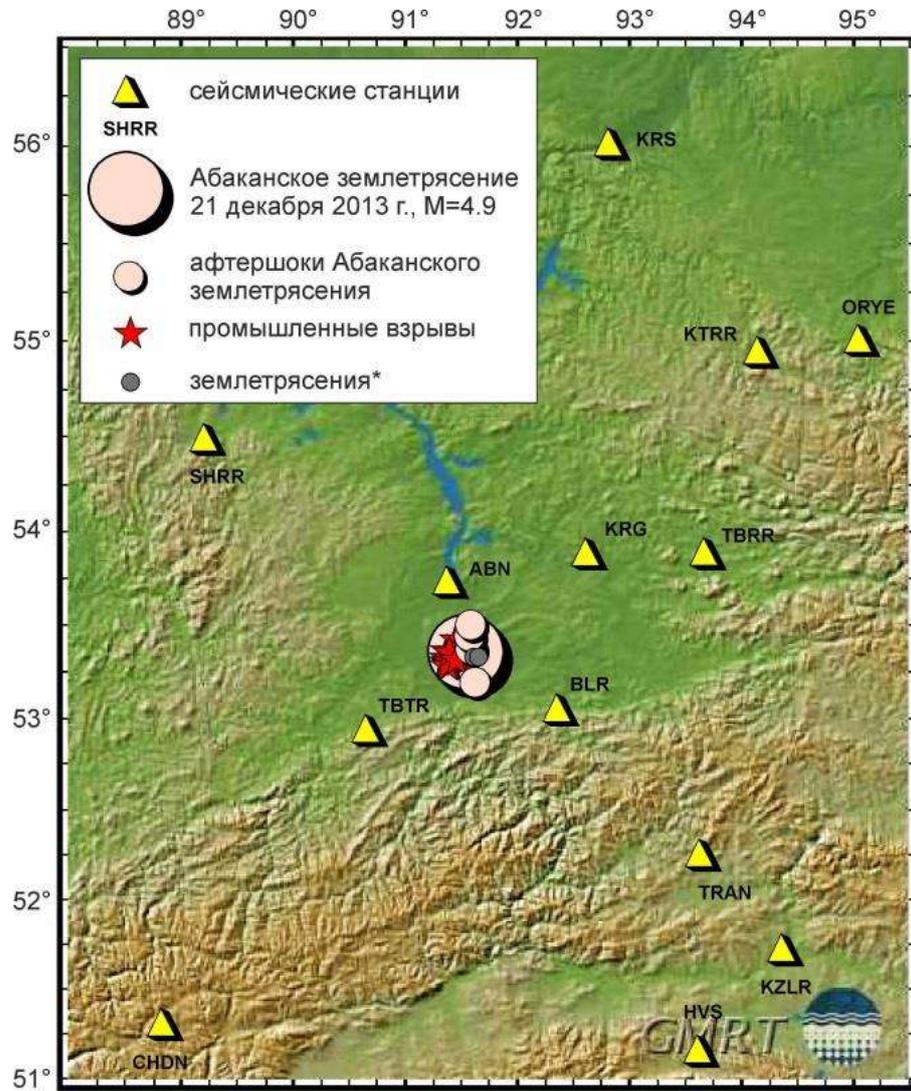


Рисунок 1.6. Расположение сейсмических станций КНИИГиМС относительно эпицентров землетрясений и промышленных взрывов [Добрынина, Герман, 2016]

Как будет показано ниже, лучшие примеры создания сейсмологических сетей контроля наведенной сейсмичности (например, таких как система мониторинга, развернутая в Кузбассе [Еманов А.Ф. и др., 2019] предусматривают создание систем двухуровневого мониторинга на основе либо сейсмических групп, либо локальных сетей.

1.3. Двухуровневый мониторинг

Создание систем двухуровневого мониторинга на базе малоапертурных сейсмических групп можно рассмотреть, как в сочетании их с системами объектового мониторинга, так и с дополнением сейсмических данных, регистрируемых группой, данными от станций региональной или локальной сейсмической сети.

Для первого варианта можно рассмотреть созданную на Кольском полуострове двухуровневую систему мониторинга, сочетающую в себе использование данных сейсмической группы и объектовой сети мониторинга рудников [Асминг и др., 2015]. В 2010 году, в результате совместной работы объектовых сейсмосетей ОАО «Апатит» и сети Кольского филиала Геофизической службы Российской академии наук (КФ ГС РАН) была создана объединенная система контроля состояния массива (ОСКСМ), позволяющая оценивать геодинамическую обстановку в Хибинском горном массиве и прилегающих территориях в режиме времени, близком реальному [Аккуратов и др., 2011]. Для мониторинга, со стороны Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН используются данные сейсмической группой Апатитский агау (АРО), описанной выше, а со стороны ОАО «Апатит», проводящего непрерывный сейсмический мониторинг полей рудников «Кировск» и «Расвумчорр» (Хибинский горный массив), данные сейсмосетей соответствующих рудников, оснащенных однотипными трехкомпонентными акселерометрами и велосиметрами, расположенных в подземных выработках (рисунок 1.7).

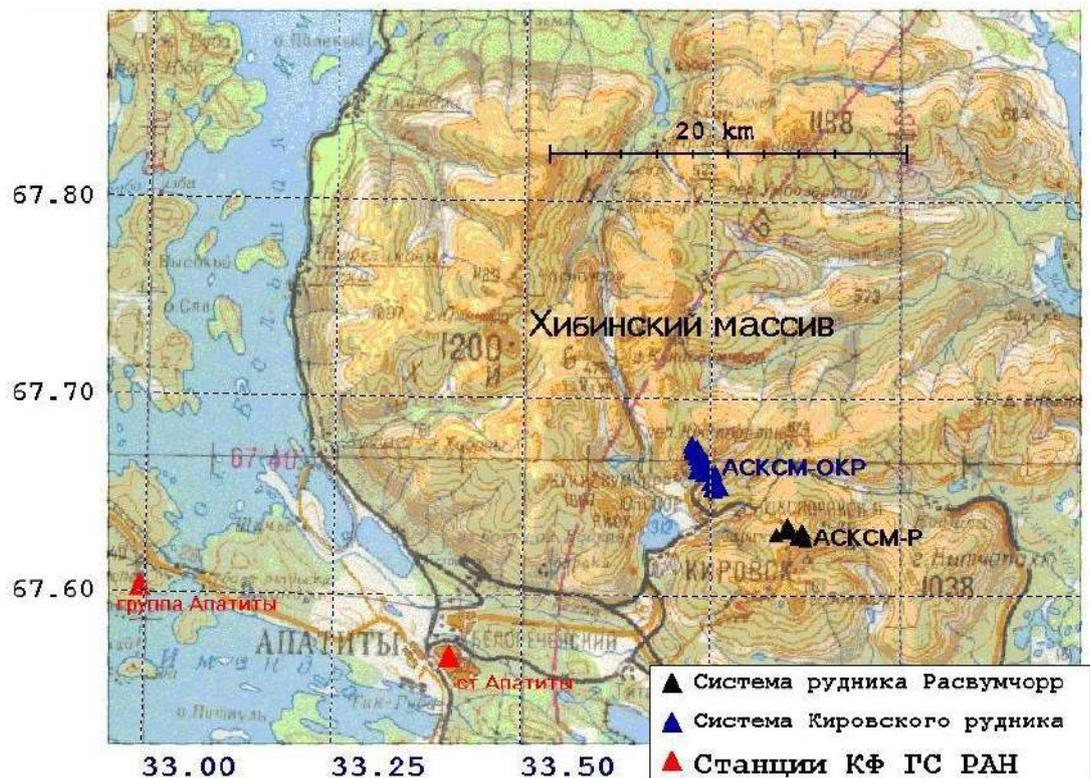


Рисунок 1.7. Расположение сеймостанций ЦГМ (Кировский и Расвумчоррский рудники) и КФ ГС РАН (станция «Апатиты» (АРА) и группа «Апатиты» (АРО)) [Асминг и др., 2015]

В результате совместного использования сетей, в том числе, выполнен эксперимент по калибровке скоростных моделей Хибинского массива.

В последние годы проведены различные эксперименты по повышению эффективности работы МСА «Михнево» за счет дополнения данных, получаемых МСА, данными стационарных и временных пунктов регистрации. Была проведена оценка точности определения координат эпицентров сейсмических событий по данным МСА «Михнево» на примере локации взрывов, производимых на карьерах, расположенных в центральной части Восточно-Европейской платформы. Показано, что точность локации в значительной степени зависит от уровня микросейсмического фона, при этом, в случае низкого отношения сигнал/шум точность локации снижается, и в этом случае данные, полученные от дополнительной станции, должны быть полезны [Санина и др., 2020]. Такие станции были установлены в 2017 году в рамках работ по исследованию глубинного строения центральной части Восточно-Европейской платформы [Гоев и др., 2020]. Три временных сейсмических пункта были оборудованы широкополосными трёхкомпонентными датчиками Guralp CMG-6TD и RefTek 151-60. Совместно с МСА «Михнево» временные сейсмические станции формируют площадную систему наблюдений с расстояниями между станциями порядка 100 км. Сравнительный анализ показал, что группа «Михнево» не допускает пропусков в регистрации событий по сравнению со станциями сети, но локация событий только по данным группы допускает разброс по азимуту (около 5°). Таким образом, включение данных наблюдений даже одной станции временной позволяет уточнить результаты локации промышленных взрывов, что подтверждает преимущества двухуровневого мониторинга.

Показателен совместный результат использования данных стационарной сейсмической группы «Курчатов-Крест» и трёхкомпонентной станции «Курчатов» IRIS-IDA сетей национального уровня, а также сети из трёх локальных станций, оборудованных широкополосными сейсмометрами CMG40T [Соколова и др., 2020]. Анализ полученных данных за 2018-2020 гг. из района Семипалатинского испытательного полигона, показал, что в районе месторождений твёрдых полезных ископаемых, где проводятся интенсивные взрывные работы, зарегистрированы техногенные землетрясения, инициированные длительным воздействием промышленных взрывов.

Интересен 25-ти летний опыт применения двухуровневой сети для мониторинга района Воронежского кристаллического массива (ВКМ), состоящей из региональных и локальных сейсмических станций [Косинова и др., 2021]. Мониторинг проводится сейсмической сетью Воронежского государственного университета и Федеральным исследовательским центром «Единая геофизическая служба РАН» состоящей из 17 стационарных станций, оснащенных регистраторами «UGRA» и двумя типами сейсмометров: CM3-КВ и CM3-ОС. Сеть регистрирует колебания скорости движения грунта при производстве взрывов и сейсмические события в диапазоне частот 0.2–20.0 Гц. За период наблюдений зафиксировано более 9000

сейсмических событий, которые возникают в процессе проведения взрывных работ в карьерах по добыче природных ресурсов (рисунок 1.8).

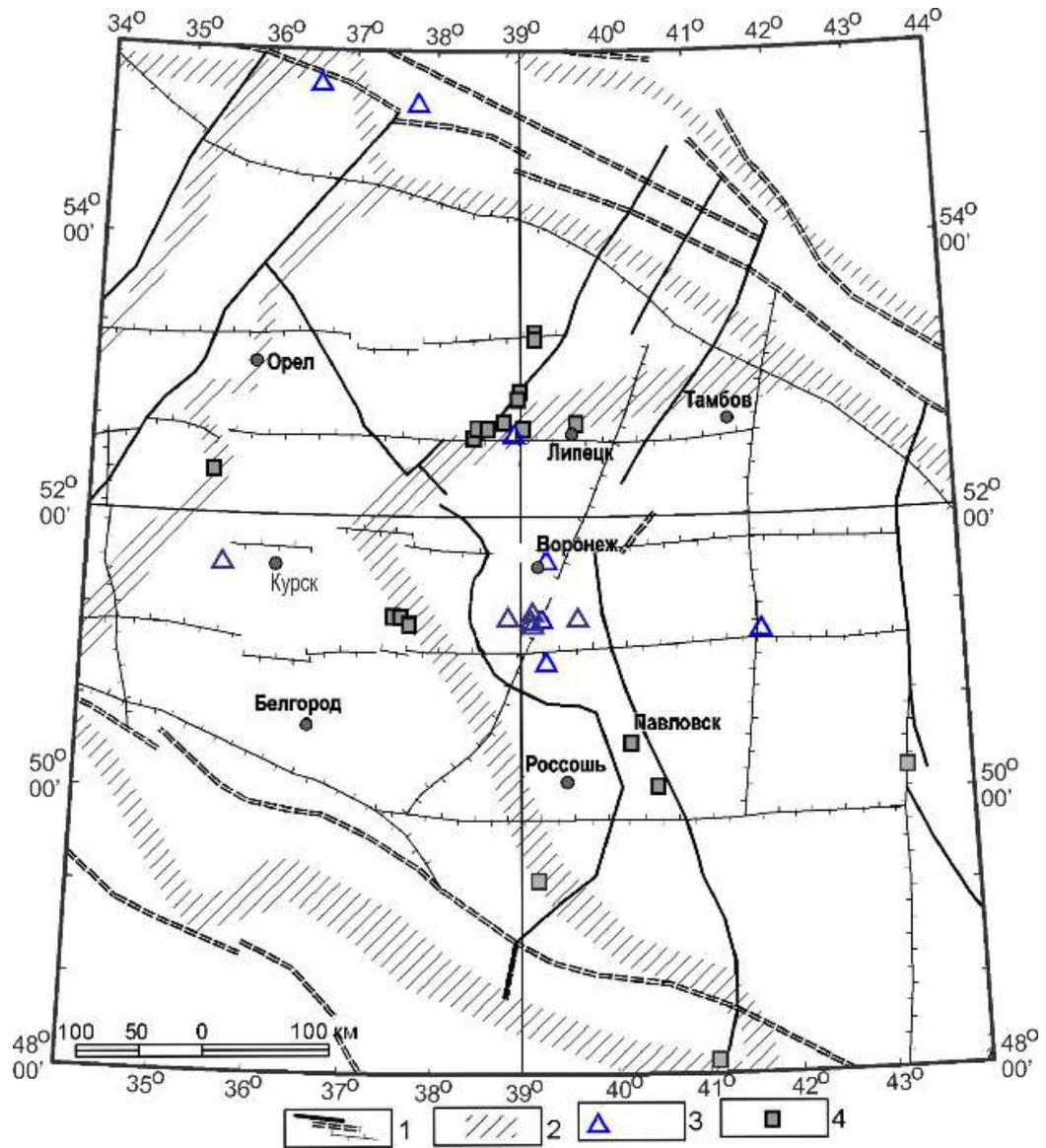


Рисунок 1.8. Пространственное положение промышленных карьеров, в которых производятся наиболее мощные взрывы. Обозначения: 1 – тектонические нарушения разных рангов; 2 – зоны сочленения геологических блоков; 3 – пункты сейсмологического наблюдения региональной сети; 4 – промышленные карьеры [Косинова и др., 2021]

Отдельно необходимо рассмотреть системы мониторинга угледобывающих шахт и разрезов Кузбасса. Кузбасс является одним из крупнейших добытчиков угля в России и мире, здесь добывается более половины российского угля. При этом выявлена тенденция увеличения доли открытой добычи угля в Кузбассе по сравнению с подземной. Соответственно, такое активное вмешательство в недра требует повышенного внимания к качеству систем мониторинга. Такой мониторинг уже много лет проводится силами Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН (АСФ ФИЦ ЕГС РАН).

Система мониторинга, созданная в Алтае-Саянском филиале, включает в себя на сегодняшний день 57 сейсмических станций [Еманов А.Ф. и др., 2019], что обеспечивает надёжную регистрацию сейсмичности всей зоны ответственности на региональном уровне, а плотные сети станций в районах угледобычи южной части Западной Сибири позволяют проводить мониторинг на локальном уровне, гарантируя на отдельных территориях региона представительную регистрацию землетрясений с $M_L=1$ [Еманов А.Ф. и др., 2021a].

Эксперименты с временными сетями, сыгравшие существенную роль в изучении природы наведённой сейсмичности в Кузбассе, были начаты в АСФ ФИЦ ЕГС РАН ещё 2005 году в районе шахт около г. Осинники [Еманов А.Ф. и др., 2007]. После этого очень важные результаты были получены при исследованиях в районе шахт около г. Полысаево [Еманов А.А. и др., 2009], где на локальном участке 10×10 км устанавливалось до 36 сейсмологических станций.

В настоящий момент для исследования наведённой сейсмичности около угольных шахт и разрезов работают три локальных группы, каждая из которых была развернута (или расширена существующая) после активизации сейсмических процессов в районах мониторинга (рисунок 1.9).

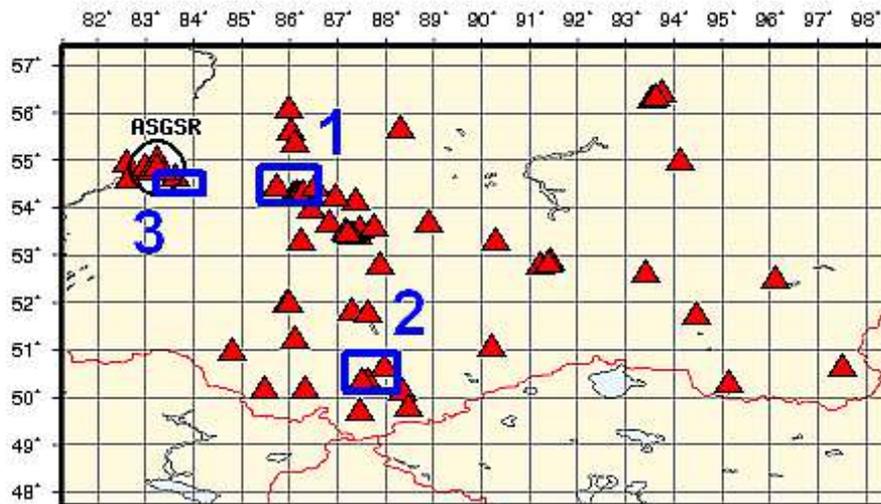


Рисунок 1.9. Карта расположения локальных сетей сейсмического мониторинга АСФ ФИЦ ЕГС РАН в районах угледобычи: 1 - Бачатский и Краснобродский угольные разрезы, 2 - локальная сеть в районе разреза Калтанский, 3 - Локальная сеть в районе разреза Колыванский

- Сеть мониторинга Бачатского и Краснобродского угольных разрезов

Исследования в районе Бачатского разреза станциями временных сетей станций проводились эпизодически еще до Бачатского землетрясения 2013 г. [Еманов А.Ф. и др., 2020]. Через шесть дней после Бачатского землетрясения были установлены дополнительные стационарные станции, после чего постоянно выполнялись наблюдения временными станциями. В настоящее время продолжают сейсмологические наблюдения в эпицентральной области Бачатского землетрясения. Техногенную сейсмичность разреза контролируют четыре стационарные станции, оборудованные сейсмометрами Guralp CMG-5T (акселерометр), Guralp CMG-6T (широкополосный велосиметр) с регистраторами Байкал-8.1, и три временные станции. Сейсмичность Краснобродского угольного разреза дополнительно контролировалась четырьмя временными станциями. [Еманов А.Ф. и др., 2021б].

- Сеть мониторинга в районе разреза «Калтанский» Кемеровской области

Развертывание локальной сети в самой южной части Кузнецкого угольного бассейна началось в 2016 году после сейсмической активизации, характеризующейся землетрясениями с $2.5 \leq M_L \leq 4$ в районе Калтанского угледобывающего разреза [Еманов А.А. и др., 2017; 2019]. Непосредственно в районе активизации была развернута временная сейсмическая сеть из 5 станций [Еманов А.Ф. и др., 2022]. В настоящее время в районе разреза «Калтанский» функционирует сеть из трёх стационарных станций, оборудованных сейсмометрами Geospace SeisMonitor с собственной частотой 1 Гц, акселерометрами А1638 с регистраторами Байкал-8.2. Кроме того, в относительной близости от активизированной области находятся две станции

сильных движений – «Малиновка» (MALIN) и «Тайлеп» (TAIL), оснащенных акселерометрами GuralpCMG-5T, что позволяет гарантированно регистрировать все сейсмические события, которые могут быть выделены на микросейсмическом фоне [Еманов А.А. и др., 2020].

- Сеть мониторинга в районе разреза «Колыванский» Новосибирской области

Ещё одна временная сеть была развернута в Новосибирской области, в районе угледобывающего разреза «Колыванский», после землетрясения произошедшего 09.01.2019 г. около г. Новосибирск, и получившего название по угольному разрезу, к которому приурочен очаг [Еманов А.Ф. и др., 2015б]. В непосредственной близости от разработок, в 7 км к югу от разреза «Колыванский», расположена стационарная сейсмическая станция «Харино», оснащенная цифровым широкополосным велосиметром со встроенным регистратором Guralp CMG-3ESPСDE. В 2017 г. дополнительно были выставлены две временные сейсмические станции, в 8 км к северо-западу и в 8 км к востоку от разреза, что позволило на качественно новом уровне проводить мониторинг техногенной сейсмичности, возникшей при добыче твердых полезных ископаемых. Комплексы состоят из регистраторов Байкал АС-75 и сейсмометров Geospace SeisMonitor и работают до настоящего времени [Еманов А.Ф. и др., 2022].

На основании этого, можно утверждать, что поставленная задача [Еманов А.Ф. и др., 2015б] по решению вопроса, связанного с развитием сети мониторинга в Кузнецкой впадине, оснащенной современными сейсмографами и аппаратурой, в целом решена. Сейсмологическая сеть Кузбасса в настоящий момент функционирует как двухуровневая: первый уровень нацелен на обнаружение техногенных сейсмических активизаций; второй уровень – на конкретную активизированную зону.

1.4. Зарубежный опыт проектирования и создания локальных сетей мониторинга наведенной сейсмичности

В зарубежной литературе построению сетей мониторинга наведенной сейсмичности уделяется значительное внимание, особенно в странах с интенсивным воздействием на недра и одновременным наличием природной сейсмичности (пример, США и Канада), где проблема индуцированной сейсмичности была обнаружена в 1960-х гг., например, [Keranen et al., 2014; Ellsworth, 2013; Frohlich et al., 2011; Horton, 2012; Kim, 2013; Rubinstein et al., 2014; 2018].

Большое количество работ зарубежных авторов и Институтов посвящено представлению подробных инструкции и нормативных требований к созданию локальных сетей сейсмического мониторинга районов с источниками индуцированной сейсмичности.

В отчёте [Templeton et al., 2021] определены последовательность и объём работ, которые нужно выполнить при проектировании и создании сети сейсмического мониторинга районов с потенциальной наведенной сейсмичностью. В работе подтверждается, что сети сейсмического мониторинга национального или регионального уровня могут предоставить информацию только о крупных событиях, происходящих в регионе. Так, Национальный информационный центр землетрясений (NEIC), например, имеет целью обнаружение и локализацию событий в США, которые превышают $M_w=2.5$ – $M_w=3.0$. Для небольших сейсмических событий обработка может занимать до нескольких недель, либо информация о них может не сообщаться из-за низкого качества данных или запись этих событий может быть замаскирована более крупными событиями. В целом, такого уровня представительности регистрации недостаточно для мониторинга наведенной сейсмичности, поскольку для выявления проблемных явлений в районе техногенного воздействия необходимо регулярное и оперативное обнаружение мелких событий в непосредственной близости от территории мониторинга. Далее в работе подробно изложены этапы проектирования сети мониторинга, из которых можно выделить следующие основные положения:

1. Сейсмическая сеть должна включать комбинацию сейсмометров регистрации слабых движений и акселерометры сильных движений;
2. Сеть сейсмического мониторинга должна быть спроектирована таким образом, чтобы обнаруживать сейсмичность в районе мониторинга, по крайней мере, с $M > 1$;
3. Сеть сейсмического мониторинга должна работать непрерывно во время эксплуатации, а данные получаемых сейсмических волн следует анализировать почти в реальном времени для обнаружения, локализации, и определения магнитуд сейсмических событий;
4. При выборе оборудования следует отдать предпочтение использованию широкополосных сейсмометров, которые могут записывать более низкие частоты движения грунта и, следовательно, может более точно измерять магнитуды и пиковые значения событий;
5. Данные должны быть записаны с использованием как минимум 24-битных цифровых регистраторов сейсмических сигналов;
6. Следует избегать азимутальных промежутков между сейсмическими станциями, превышающих или равных 120 градусам;
7. Сеть должна состоять как минимум из 5-6 сейсмических станций для небольшой временной сейсмической группы, но для детальных работ или в случае территориально большого района её лучше расширить её до 10-20 станций;
8. Наконец, должны быть использованы современные системы связи (4G, Интернет) для объединения сейсмических сигналы с разных станций или даже сетей.

Отдельно отмечается, что при проектировании сети локального мониторинга первым шагом в понимании потенциала наведенной сейсмичности нового проекта является исследование ближайшей прошлой и настоящей сейсмичности района и тектонические структуры района, влияющие на сейсмичность. Для такого анализа следует выбирать регион намного больше, чем сам участок с техногенным воздействием (минимум радиусом 200 км), чтобы обеспечить учет более широких региональных трендов в оценке сейсмической опасности.

Рекомендации по мониторингу наведенной сейсмичности также достаточно детально перечислены в документе с изложением позиции FKPE (Forschungskollegium Physik des Erdkörpers - Исследовательского Института физики Земли, представляющего собой объединение геофизических исследовательских институтов Германии) [Baisch et al., 2012]. В работе значительное внимание уделено основам выбора мест установки станций для создания локальной сети мониторинга района с источником техногенных воздействий на недра. Отмечается, что прежде всего необходимы исследования сейсмического шума на площадках установки, поскольку местоположение сейсмологической станции оказывает решающее влияние на качество регистрируемых сигналов землетрясений. Согласно известным критериям [Groosetal., 2010] допускаются следующие уровни сигналов помех: в диапазоне частот 5-40 Гц: приемлемо < 2000 нм/с; хорошо < 500 нм/с; очень хорошо < 100 нм/с, в диапазоне частот 5-15 Гц: приемлемо < 500 нм/с; хорошо < 200 нм/с; очень хорошо < 50 нм/с. Для оценки приведенных параметров авторы рекомендуют измерять фоновый шум на каждом предполагаемом месте установки не менее 7 дней перед установкой постоянного оборудования.

Однако отдельно отмечается, что в дополнение к чисто сейсмологическим критериям выбора возможного места установки оборудования также важны технические и логистические соображения, включающие в себя:

- Наличие технической инфраструктуры (например, подключение к постоянному электроснабжению и наличие каналы передачи данных);
- Доступность и безопасность места установки оборудования (подразумевается возможность оперативного доступа для устранения возможных неисправностей, защищенность от вандализма и природных воздействий (например, молнии));
- Затраты на внедрение (приоритетно использование существующей инфраструктуры, чтобы избежать затрат на строительство);
- Наличие согласия собственника объекта (земельного участка) на размещение оборудования и его эксплуатацию.

Критерии определяющие число и топологию размещения станций сети локального мониторинга согласно позиции FKPE предусматривают не менее 5 станций сети в

непосредственной близости от района техногенного воздействия (на расстоянии <15 км). Отмечается, что при оптимальных условиях для локализации могут также использоваться сети только с 3 или 4 станциями. событий, а также не обеспечивают резервирования в случае отказа станции. При этом, для достижения хорошей локализации по глубине не все станции должны располагаться на одинаковом расстоянии от возможного источника. Азимутальные углы между станциями должны быть как можно равными и малыми для достижения хорошего разрешения горизонтальной локализации. Не должно быть азимутального диапазона более 90° от сейсмического источника без измерительной станции.

Вопросам выбора оборудования для локальных сетей сейсмического мониторинга индуцированной сейсмичности уделяется значительное внимание в материалах представляемых, прежде всего, на различных тематических зарубежных конференциях, посвященных проблемам мониторинга. Многочисленные работы показывают что для мониторинга наведенной сейсмичности за рубежом в последние годы наблюдается заметный переход к использованию широкополосных сейсмометров в локальных сетях. Так, в работе [Igonin et al., 2017] проведено сравнительное исследование скважинных групп, широкополосных сейсмометров и наземных короткопериодных сейсмоприемников с использованием сейсмических данных из района Фокс-Крик, Альберта (Канада). Наведенная сейсмичность и микросейсмические события сравнивались на основе характера волны, точности времени прихода и частотного содержания. Используя взаимную корреляцию, сравнивалась эффективность каждого из инструментов при обнаружении событий. Сделан вывод, что для мониторинга наведенной сейсмичности наиболее эффективны широкополосные сейсмометры, а для микросейсмического мониторинга - скважинная установка оборудования.

[Cairns et al., 2014] рассматривают пример небольшой компактной сети на базе широкополосных сейсмометров, размещенной вокруг источника техногенной опасности в регионе с постоянной сейсмичностью (Норманн Уэллс, Северо-Западная территория, Канада). На четырех станциях сейсмического мониторинга использовались широкополосные сейсмометры Guralp 40T, Guralp 3ESP и Nanometrics Trillium120PH. Сейсмометры были размещены в 24-53 км от источника техногенного воздействия и установлены на коренных породах. В течение двух месяцев записи, с помощью трех-четырёх станций группы было локализовано 101 землетрясение с магнитудами от 1.7 до 4.6. Для сравнения, за тот же период Канадская национальная сейсмическая сеть (CNSN) зафиксировала 13 землетрясений в том же регионе в радиусе 400 км с минимальным порогом магнитуды 2.4.

Вопросы посвященные способу установки широкополосных сейсмометров рассматриваются в работе [Laporte et al., 2015]. Приводится пример моделирования регистрационных возможностей локальной сети, для станций с различной глубиной установки.

В результате моделирования показано, что локальная группа, обнаруживающая небольшие, близлежащие сейсмические события, может выиграть от размещения датчиков на глубине 15-30 м, при этом минимальная регистрируемая магнитуда уменьшается на 0.6 по сравнению с неглубокими, непосредственно заглубленными станциями. Однако, такое же преимущество может быть получено просто за счет более близкого расположения неглубоких станций с дополнительным повышением точности определения местоположения за счет более плотного массива. Таким образом, сеть из неглубоких, непосредственно заглубленных инструментов с соответствующим расстоянием между станциями может обеспечить наиболее эффективное решение для локальных сетей.

Моделирование с целью определения оптимального расположения станций на участке мониторинга представлено [Baturanetal., 2016]. В работе отмечается важность оптимального определения числа станций локальной сети мониторинга индуцированной сейсмичности при отсутствии существующих каталогов землетрясений с высоким разрешением для района мониторинга, подлежащих мониторингу. В этом случае предлагается методика моделирования, основанная на предварительном измерении уровня шума на площадке мониторинга. Рисунок 1.10b иллюстрирует первоначальные результаты моделирования минимальной пороговой магнитуды M_c для сети с 4 станциями. На рисунке 1.10c показаны характеристики той же сети с 4 станциями, расположение станций скорректировано с учетом измеренного шумового поля, показанного на рисунке 1.10a. В этом конкретном примере перемещение станций для избежания мест установки в зонах с высоким уровнем шума улучшает оценку M_c на 0.2 единицы без добавления новых станций (т.е. сохранения той же стоимости). Таким образом, наглядно показано, что размещение станций в районах с меньшим уровнем шума приводит к более полному каталогу событий, что, в свою очередь, может позволить операторам лучше управлять рисками.

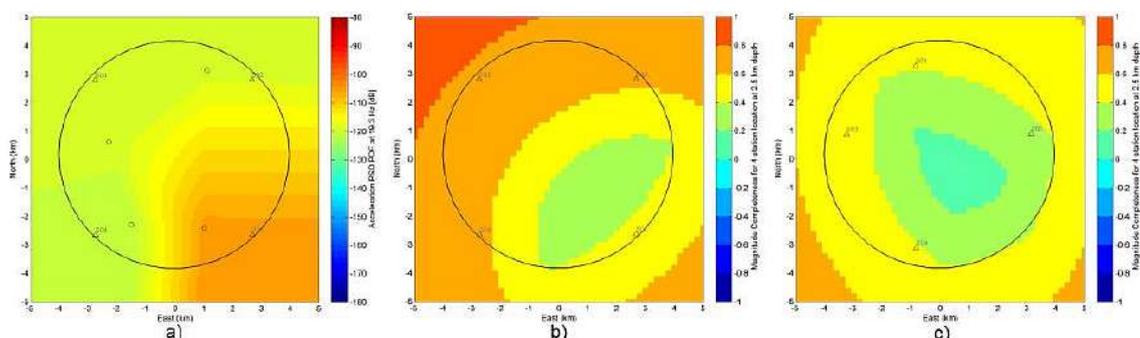


Рисунок 1.10. Шумовое поле PSD (a), используемое в качестве входных данных для базового моделирования характеристик сети с 4 станциями для начального (b) и оптимального (c) размещения станций [Baturanetal., 2016]

Интерес представляют исследования проведенные [Yenier et al., 2016]. Данная работа может служить рекомендацией по выбору оборудования для регистрации индуцированной сейсмичности на локальном уровне. В работе проводилось сравнение двух пар короткопериодных сейсмоприемников и широкополосных сейсмометров, которые были совмещены в ходе развертывания системы индуцированного сейсмического мониторинга (ISM) в реальных условиях. Короткопериодный сейсмоприемник и широкополосный сейсмометр были расположены в пределах 3 м друг от друга и, таким образом, подвергались одинаковым колебаниям грунта. Было обнаружено, что магнитуда событий, полученная с использованием данных короткопериодных сейсмометров, обычно занижает широкополосную магнитуду событий для событий на типичных гипоцентральных расстояниях ISM от 10 до 50 км. Этот эффект является результатом насыщения амплитуды из-за неспособности сейсмоприемника измерять низкочастотные движения, связанные с более крупными событиями. Кроме того, было обнаружено, что пиковые скорости грунта, рассчитанные с использованием данных сейсмоприемника, также были занижены для изучаемых событий.

Изложенный выше зарубежный опыт следует рассматривать как полезное обобщение для построения локальных сетей наведенной сейсмичности в качестве инструкций для практической реализации.

Выводы по главе 1

В первой главе рассмотрены проявления наведенной сейсмичности около горнодобывающих предприятий. Отмечено, что добыча угля создает сильнейшее техногенное воздействие на земную кору и, как следствие, запускает масштабный процесс развития наведенной сейсмичности, исследование которой в настоящее время является одной из важнейших задач прикладной и фундаментальной сейсмологии. Поэтому, очевидна важность мониторинга сейсмического режима районов с активными разработками полезных ископаемых вообще и открытым способом, в частности, особенно для определения возможной активизации сейсмических событий с минимальным порогом обнаружения.

Выполнена классификация методов сейсмического мониторинга районов с наведенной сейсмичностью. Выделены основные уровни мониторинга — национальный, региональный и локальный. Для локального уровня мониторинга, как предпочтительного при решении задач исследования наведенной сейсмичности, рассмотрены основные способы построения сетей на основе примеров, реализованных в последние годы в Российской Федерации. Установлено, что преимущество имеют локальные сети, размещенные непосредственно вблизи объекта исследования, которые используются для решения как научных, так и практических проблем, связанных с производственными процессами на объектах угледобывающей промышленности.

Показано, что лучшие примеры создания сейсмологических сетей контроля наведенной сейсмичности предусматривают создание систем двухуровневого мониторинга на основе сочетания локальных и региональных сетей. Детально рассмотрены примеры реализации двухуровневого мониторинга для угледобывающих шахт и разрезов Кузбасса. При рассмотрении принципов построения локальных сетей большое внимание уделено топологии существующих сетей и используемому в них сейсмическому оборудованию.

Изучены существующие требования и методики построения сетей мониторинга районов с наведенной сейсмичностью за рубежом. Рассмотрены примеры моделирования с целью определения оптимального расположения станций на участке мониторинга. Замечена распространенная тенденция использования широкополосных сейсмометров при построении сетей локального мониторинга их преимущества.

ГЛАВА 2. ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО РАЙОНА О. САХАЛИН¹

Запасы полезных ископаемых острова Сахалин разнообразны и по отдельным видам достаточно велики. На Сахалине насчитывается более 50 видов минерального сырья, из которых первоочередное значение имеют добыча нефти, газа, каменного и бурого угля. Активная разработка перечисленных полезных ископаемых сопровождается значительным воздействием на территории острова, обладающим большим сейсмогенным потенциалом. При этом, если для разработок месторождений нефти и газа существуют отдельные исследования по техногенному воздействию [Николаев, 1995; Тихонов, 2010; Ковачев и др., 2018], то влияние разработок угольных месторождений на сейсмичность районов добычи до настоящего времени остается для Сахалина неизученным направлением. Мотив для проведения таких исследований заключается не только в отсутствии таких работ, но и в существенном увеличении активности по добыче ресурсов. В данной главе предлагается рассмотреть сейсмичность угледобывающего района, на предмет выявления, как общепринятых индикаторов техногенного отклика [Dahm et al., 2013], так и, по возможности, определения новых особенностей сейсмического процесса в условиях резкого увеличения степени воздействия на геосреду [Kostylev et al., 2022].

2.1. Район исследования

Согласно картам общего сейсмического районирования (введены в действие в 2015 году), территория Сахалина располагается в зоне 8-9-балльных землетрясений с вероятностью повторения 10% на периоде в 50 лет [ОСР-2015].

¹При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Kostylev, D.V.**, Boginskaya, N.V. & Zakupin, A.S. Seismic Activity in the Focus of the Ulegorsk Earthquakes, Sakhalin Island, Related to Intensive Development of Coal Deposits // *Pure and Applied Geophysics*. – 2022. – No. 179. – P. 4221–4232. – DOI 10.1007/s00024-021-02933-6. (1,5 п.л., вклад автора 60%, импакт-фактор JCI – 0,570)
2. Семенова Е.П., Богинская Н.В., **Костылев Д.В.** Углегорское землетрясение 13 сентября 2020 года (о. Сахалин): предпосылки возникновения и результаты наблюдений в эпицентральной зоне // *Геосистемы переходных зон*. – 2020. – Т.4, № 4. – С. 474-485. – DOI 10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485. (ИФ РИНЦ: 0,806. 1.5 п.л., авторский вклад 50%).

Природа землетрясений Сахалина тектоническая. Гипоцентры располагаются преимущественно на глубинах 5-35 км и связаны с зонами региональных разломов: Западно-Сахалинского, Центральнo-Сахалинского и Хоккайдо-Сахалинского. Западно-Сахалинский разлом протягивается вдоль западного побережья острова на расстояние более 600 км и проявляется в виде системы взаимосвязанных сбросов и взбросов, сопровождающихся нарушениями северо-западного и северо-восточного простираний и системами сопряженных линейных антиклиналей и синклиналей (рисунок 2.1). Широтными и диагональными сбросами и взбросами разлом разделяется на множество секторов. Ширина зоны приразломных дислокаций составляет до 20 км. Глубинное заложение разлома определяется его пространственной связью с магматическим поясом, протягивающимся по побережью Сахалина от пос. Усть-Агнево на севере до мыса Ламанон на юге [Дымович и др., 2017]. Западно-Сахалинский разлом и приуроченные к нему пластовые формы являются одним из основных волноводов в недрах среднего и южного Сахалина и создают необходимые условия для распространения деформационного фронта благодаря минимальной диссипации напряжений [Сапрыгин, 2017]. Сейсмическая активность Западно-Сахалинского разлома достаточно высока. В его зоне наблюдалось несколько землетрясений с $M > 5.9$ (рисунок 2.1): Лесогорско-Углегорское, 1924 г. ($M=6.8$; 8-9 баллов) [Соловьев и др., 1967] и Углегорско-Айнское, 2000 г. ($M_w=7.1$; 9 баллов) [Поплавская и др., 2006].

За 20 лет, прошедших с момента Углегорско-Айнского землетрясения 2000 года, в исследуемом районе произошло несколько коровых землетрясений с $M > 4.5$ и имеющих макросейсмический эффект, например, землетрясение 8 февраля 2003 года $M_{LN}=5.1$ [Фокина и др., 2009], однако наибольший резонанс получило сейсмическое событие $M_L=4.8$ 13 сентября 2020, произошедшее в районе активной разработки угольных месторождений [Семенова и др., 2020].

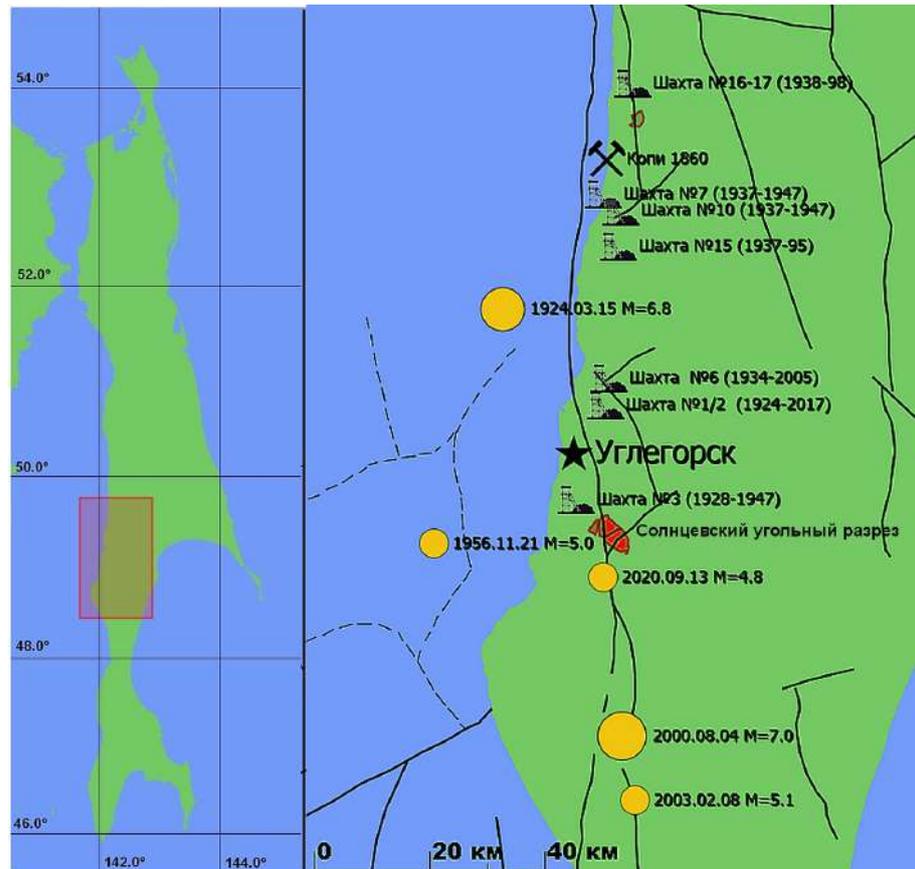


Рисунок 2.1. Расположение исследуемого района. Слева: область исследования на карте о. Сахалин; справа: тектонические разломы [Дымович и др., 2017], красным цветом и значками обозначены районы угледобычи, желтыми кружками показаны сильнейшие сейсмические события в исследуемом районе

Угленосность Углегорского района связана с отложениями палеогена и неогена. К отложениям неогенового возраста приурочены 8 месторождений, в числе которых крупные разрабатываемые месторождения Бошняковское, Лесогорское Шахтерское (Углегорское), Солнцевское и другие (рисунок 2.1). Как правило, все месторождения имеют сложное геологическое строение, с крутыми углами падения, осложненные тектоническими нарушениями [Недра Сахалинской области, 2013]. Изучение и освоение угольных ресурсов в Углегорском районе Сахалинской области началось еще в 1860 году [Вакуленко, 2004]. Наибольшего развития этап освоения угольных ресурсов Сахалина в 20 веке произошел в период существования на южном Сахалине японского губернаторства Карафутто, когда на территории современного Углегорского района были открыты 15 шахт в 11 поселках [Masafumi, 2017]. Большинство из них было закрыто в середине 20 века, а к концу 20 века, когда в 90-х годах угольная промышленность Сахалина находилась в глубочайшем кризисе, работали 4 шахты. Две из них («Тельновская» и «Бошняково») были закрыты соответственно в 1995 и 1998 годах [Вакуленко, 2015], а последние две шахты («Углегорская» и «Ударновская»)

официально были закрыты уже в 21 веке (2005 и 2017 года), хотя добыча угля на шахте «Ударновская» был фактически приостановлена в 2009 году [Дорохина, 2018]. Возрождение началось в начале второго десятилетия 21 века, когда произошли существенные изменения в технологиях с переводом добычи угля из шахт на открытые разрезы. В настоящее время крупнейшим угледобывающим предприятием Сахалинской области, обладающим полным циклом по добыче и отгрузке твердого топлива, является ООО «Восточная горнорудная компания» (ВГК) с входящими в нее ООО «Солнцевский угольный разрез» и ООО «Угольный морской порт Шахтерск», расположенными в Углегорском районе [Уголь, 2011]. Солнцевское буроугольное месторождение в Углегорском районе Сахалинской области было открыто в 1980-х гг. и сразу было признано самым перспективным на острове. Его площадь составляет более 100 кв. км. Продуктивная толща верхнедуйской свиты мощностью до 600 м содержит 12 угольных пластов, из которых 8 являются рабочими. Однако долгое время раскрыть его потенциал не удавалось. Например, за 1987-2003 гг. в совокупности было добыто всего 4.4 млн т угля. Ситуация начала меняться с 2011 г., когда новые собственники Солнцевского угольного разреза запустили масштабную программу переоснащения предприятий [Уголь, 2019]. Уже в 2012 году горняки ООО «ВГК», которому принадлежит Солнцевский разрез, сумели увеличить добычу угля до 1.2 млн. т в 2012 г. и до 1.8 млн. т в 2013 г. [Андреев Уголь, 2014]. Реализация новых проектов в 2020 г. позволила ВГК достичь рекордных объемов добычи и отгрузки в 11 млн т угля. [Уголь, 2021], что составляет 78% от общей добычи угля в Сахалинской области (рисунок 2.2). Таким образом, налицо коренная перестройка технологий добычи за последние 20 лет. Подводя итог этим переменам в общих цифрах, можно еще раз отметить, что до середины 90-х годов основная добыча угля на о. Сахалин вообще, и в Углегорском районе в частности, велась подземным методом (шахты), а уже в 2000 году удельный вес добычи угля открытым способом составил 80% [Ковальчук, 2002], к 2010 году - 94% [Стрельцов, 2010], а начиная с 2017, после закрытия последней шахты Сахалина — 100%.

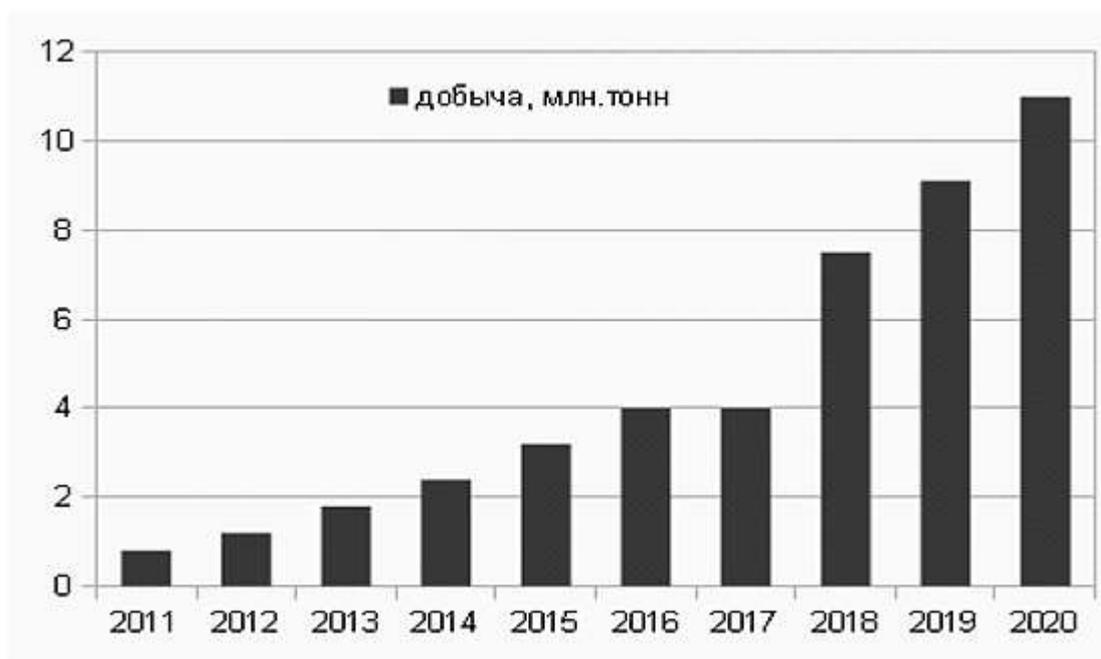


Рисунок 2.2. Динамика изменения объемов добычи угля на Солнцевском угольном месторождении за 10 лет

Вышеуказанные изменения в объемах добычи угля при проведении вскрышных работ, не могли не отразиться на изменении рельефа окружающих территорий, что наглядно иллюстрируется сервисом «Исторические снимки» приложения GoogleEarth [<https://earth.google.com/web/>] для периода 2000 - 2020 годы (рисунок 2.3).

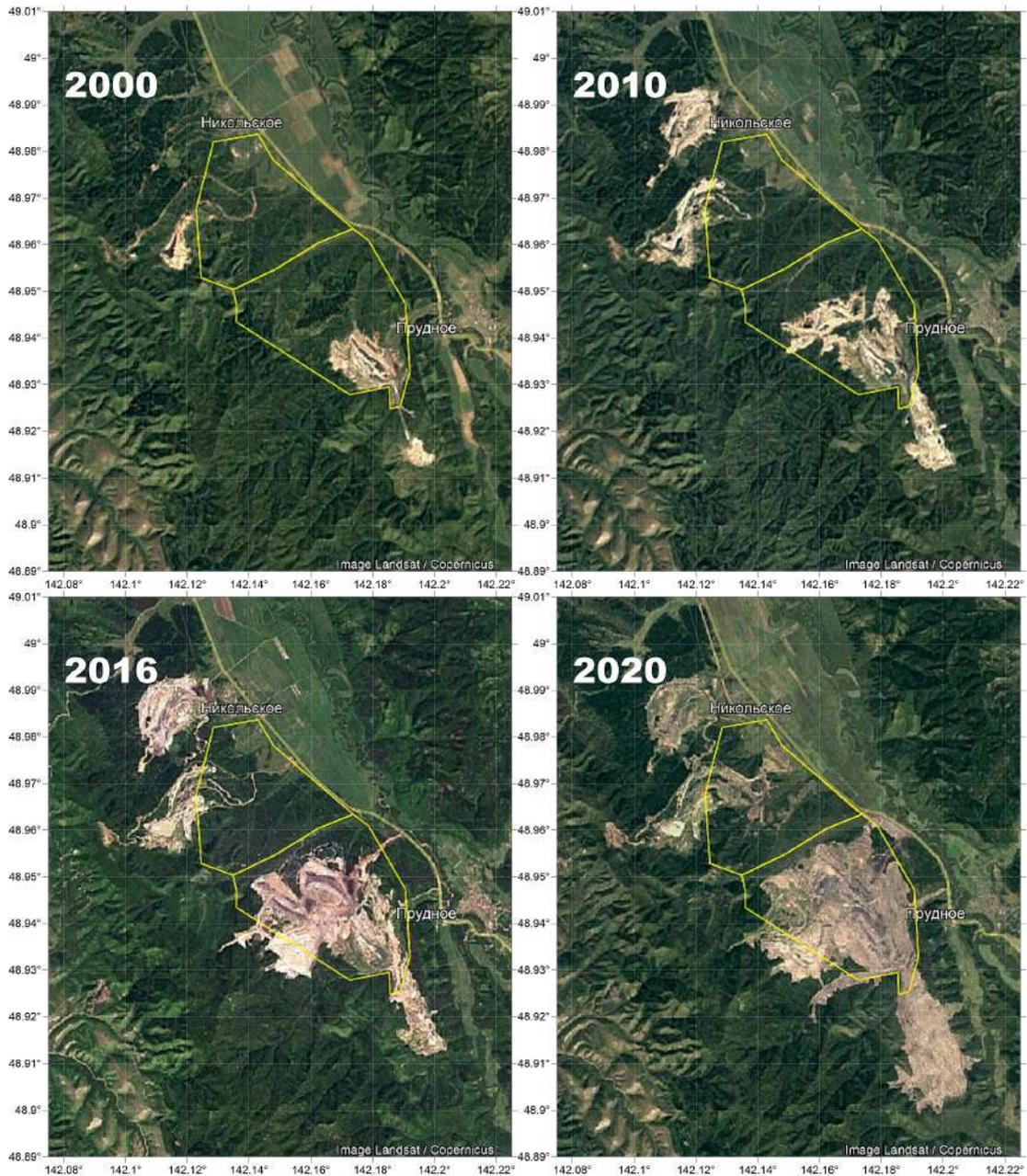


Рисунок 2.3. Спутниковые снимки района СУР за 2000 — 2020 годы. Жёлтым контуром показаны лицензионные участки ООО «Солнцевский угольный разрез»

В контексте вышеизложенного, особенный интерес представляют сильные землетрясения, связанные с подвижками по разломам, расположенным в районах добычи угля, как, например, вышеупомянутое землетрясение с $M_L=4.8$, произошедшее 13 сентября 2020 года [Семенова и др., 2020] в непосредственной близости к Солнцевскому угольному разрезу. Особенности возникновения этого сейсмического события будут рассмотрены в следующих разделах.

2.2. Особенности сейсмического процесса Углегорского землетрясения 13.09.2020 г. ($M_L=4.8$)

13 сентября 2020 г. в Углегорском районе Сахалинской области было зарегистрировано землетрясение с магнитудой $M_L=4.8$. В таблице 2.1 приведены параметры главного толчка 13.09.2020 г. в 13:42 UTC (00:42 14.09.2020 г. сахалинского времени) по данным международных сейсмологических центров и регионального информационно-обработывающего центра (РИОЦ) «Южно-Сахалинск» [Семенова и др., 2020].

Таблица 2.1.

Параметры землетрясения 13.09.2020 13:42 UTC по данным различных сейсмологических центров

Источник	Время в очаге, ч:мин:с	Координаты эпицентра		Глубина h , км	Магнитуда
		φ° N	λ° E		
РИОЦ «Южно-Сахалинск»	13:42:26.2	48.89	142.14	8	$M_L = 4.8$ $MPV(A) = 4.9$
EMSC	13:42:26.3	48.95	142.06	10	$mb = 4.9$
ССД ЕГС РАН	13:42:26.0	48.96	142.00	10	$mb = 5.1$
GFZ	13:42:26.8	48.93	142.15	10	$mb = 4.8$
USGS	13:42:26.4	48.93	142.09	10	$mb=5.0$

Примечание: РИОЦ «Южно-Сахалинск» – региональный информационно-обработывающий центр Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН; EMSC – Европейско-Средиземноморский сейсмологический центр (<https://www.emsc-csem.org>); ССД ЕГС РАН – Служба срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН, GFZ – германский исследовательский центр геонаук (<https://www.gfz-potsdam.de>); USGS – Геологическая служба США (<https://www.usgs.gov>). $MPV(A)$ – магнитуда по волне P (тип аппаратуры A), принятая в практике ГС РАН; M_L – локальная магнитуда; mb – магнитуда по P-волнам короткопериодной записи, принятая в практике USGS/NEIS.

На рисунке 2.4 приведена карта с эпицентром землетрясения 13 сентября 2020 г. в 13:42 UTC и показаны варианты локализации эпицентра главного толчка по данным разных сейсмологических служб. Разброс в вариантах положения эпицентра Углегорского землетрясения находится в диапазоне $\Delta\varphi=48.89\text{--}48.96^\circ\text{N}$, $\Delta\lambda=142.00\text{--}142.15^\circ\text{E}$ и определяется различной конфигурацией сети сейсмических станций регистрации, данные которых были использованы при локализации сейсмического события.

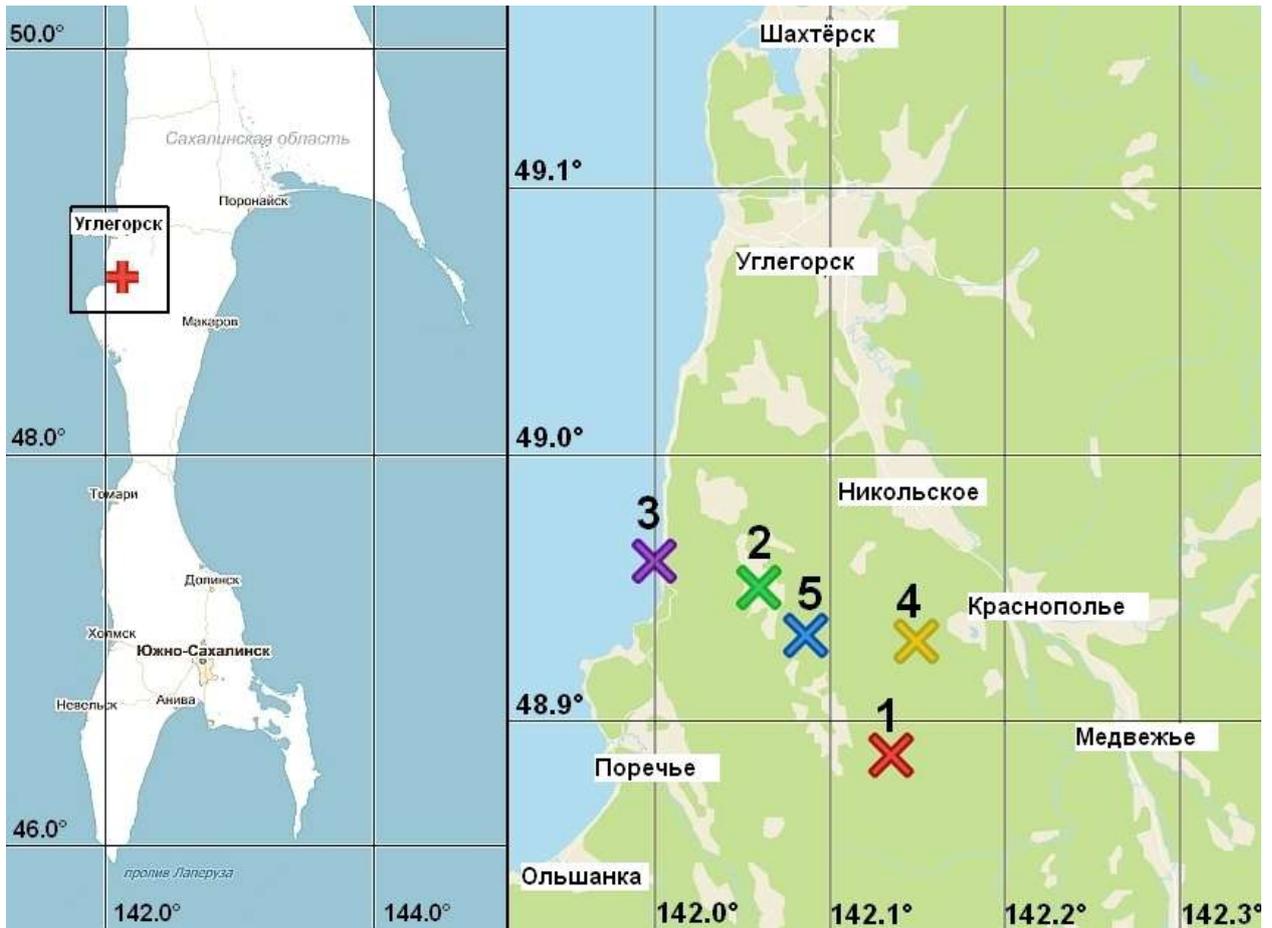


Рисунок 2.4. Слева – положение эпицентра Углегорского землетрясения 13.09.2020 г. в 13:42 UTC по данным РИОЦ «Южно-Сахалинск». Справа фрагмент с различными вариантами локализации эпицентра главного толчка по данным: 1 – РИОЦ «Южно-Сахалинск»; 2 – EMSC; 3 – ССД ЕГС РАН; 4 – GFZ; 5 – USGS

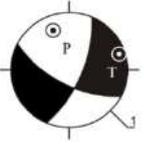
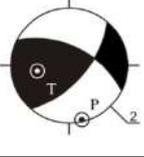
Энергетическая величина землетрясения 13 сентября 2020 г., выполненная по разным магнитудным шкалам, принятым в практике различных сейсмологических центров, показала сопоставимые по величине значения, среднее отклонение составило ± 0.1 единицы. Глубина очага h данного сейсмического события колеблется от 8 до 10 км (таблица 2.1), что соответствует современным заключениям о тектонике о. Сахалин [Оскорбин, Бобков, 1997а].

Механизм очага землетрясения 13 сентября 2020 г. в 13:42 UTC с магнитудой $M_L=4.8$ был определен с помощью вычислительного модуля FOCMEC, интегрированного в комплекс сейсмологических программ SEISAN [Ottmölleretal., 2011]. Всего было использовано 30 знаков вступлений первых движений P -волны при одном несогласованном знаке, зарегистрированных на вертикальной компоненте записей сейсмических колебаний. В соответствии с полученным решением подвижка в очаге реализовалась в условиях горизонтального субширотного растяжения и близгоризонтального субмеридионального сжатия, т.е. может классифицироваться как сдвиг либо левосторонний вдоль плоскости $NP1$ северо-восточного

простирается, либо правосторонний вдоль плоскости NP2 юго-восточного простирается (таблица 2.2).

Таблица 2.2.

Параметры механизма очага землетрясений 13.09.2020 в 13:42 UTC и его афтершока (14:09 UTC)

Параметры землетрясения	Оси главных напряжений				Нодальные плоскости						Тип сейсмодислокации	Стереодиаграмма механизмов (нижняя полусфера)
	T		P		NP1			NP2				
	PL	Az	PL	Az	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP		
13.09.2020 13:42 UTC $M_L=4.8$	9	72	24	338	23	80	-24	118	66	-169	Сдвиг	
13.09.2020 14:09 UTC $M_L=4.6$	41	260	3	168	41	65	33	295	60	150	Сдвиг	

В таблице 2.2 представлено также решение механизма для сильного повторного толчка 13 сентября 2020 г. в 14:09 UTC с магнитудой $M_L=4.6$. Задействовано 26 знаков первых вступлений P -волны при 2 несогласованных, зарегистрированных на вертикальной компоненте записей сейсмических колебаний. Тип сейсмодислокации сдвиговой, как и у главного события, однако наклон главных осей напряжений несколько изменился: ось сжатия субмеридионального простирается горизонтальна, а ось растяжения субширотного простирается наклонена под углом к западу, ориентация и направление подвижки по нодальной плоскости NP1 примерно соответствует главному событию, плоскость NP2 поменяла направление падения с юго-западного на северо-восточное.

2.2.1. Макросейсмические проявления Угледорского землетрясения 13 сентября 2020 г.

Землетрясение 13 сентября 2020 г. вызвало сотрясения силой до 5 баллов по шкале сейсмической интенсивности MSK-64 в населенных пунктах Никольское, Краснополье, Медвежье. По результатам макросейсмического обследования в эпицентральной зоне Угледорского землетрясения в этих населенных пунктах были выявлены повреждения отдельных зданий. В с. Медвежье сдвинулся ряд шлакоблоков, которые поддерживали крышу

хозяйственной пристройки к одноэтажному дому. В селах Краснополье и Никольское наиболее наглядно повреждения проявились внутри зданий школ: множественные волосяные трещины на стенах и потолке в помещениях классов, выпадения кусков штукатурки, сдвинулись смежноукрепленные здания школы и спортивного зала с. Никольское. На рисунке 2.5 фрагменты повреждений зданий школ сел Никольское и Краснополье.



Рисунок 2.5. Выявленные повреждения зданий школ в селах Никольское (вверху) и Краснополье (внизу) по результатам макросейсмического обследования эпицентральной зоны Угледорского землетрясения 13.09.2020 г.

В таблице 2.3 приводятся результаты макросейсмического обследования в эпицентральной зоне Угледорского землетрясения 13 сентября 2020 г.

Таблица 2.3.

Результаты макросейсмического обследования в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения 13.09.2020 г.

Населенный пункт	D, км	Балл по шкале MSK-64
с. Поречье	11	4
с. Краснополье	13	5
с. Никольское	15	5–6
с. Ольшанка	14	4
с. Медвежье	15	5
с. Ольховка	19	4–5
с. Орлово	16	4–5
г. Углегорск	22	4–5
с. Трудовик	22	4
пос. Шахтерск	32	3–4
с. Айнское	38	Не ощутили
с. Тельновский	55	Не ощутили
с. Лесогорск	60	1–2
с. Красногорск	56	2
с. Ильинское	103	Не ощутили

Примечание. D, км – гипоцентральной расстояние от эпицентра до пункта наблюдений.

На рисунке 2.6 представлена карта-схема интенсивности сотрясений от Углегорского землетрясения 13 сентября 2020 г. по результатам проведенного макросейсмического обследования в эпицентральной зоне (таблица 2.3).

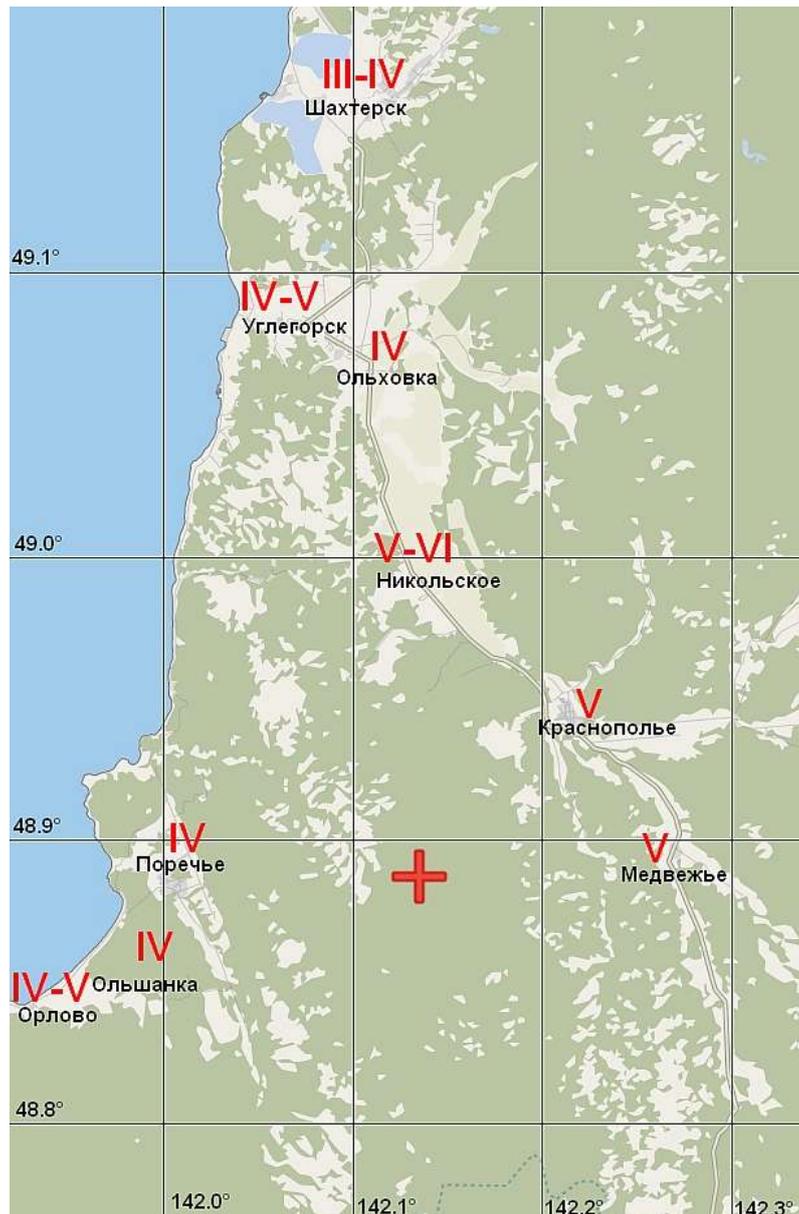


Рисунок 2.6. Карта-схема интенсивности сотрясений Углегорского землетрясения 13.09.2020 г. Римские цифры – балл интенсивности (таблица 2.3)

Стоит отметить, что в населенных пунктах Орлово, Ольшанка и Поречье, расположенных на побережье Татарского пролива с западной стороны Камышевого хребта, землетрясение ощутили слабее. Можно предположить, что это обусловлено особенностью рельефа. На всем протяжении рельеф острова характеризуется как система субмеридиональных поднятий и понижений. И при возникновении землетрясений субмеридиональные поднятия Сахалина частично поглощают энергию сейсмических волн [Семенова и др., 2013].

По данным макросейсмического обследования был построен график затухания интенсивности сотрясений в зависимости от гипоцентрального расстояния (рисунок 2.7), с использованием метода средних квадратов вычислен коэффициент затухания для Углегорского

землетрясения 13 сентября 2020 г. При глубине гипоцентра землетрясения $h=8$ км коэффициент затухания составил $\nu=4.2$, это соответствует принятому для Сахалина значению $\nu=4.3\pm 0.6$ [Оскорбин, 1977].

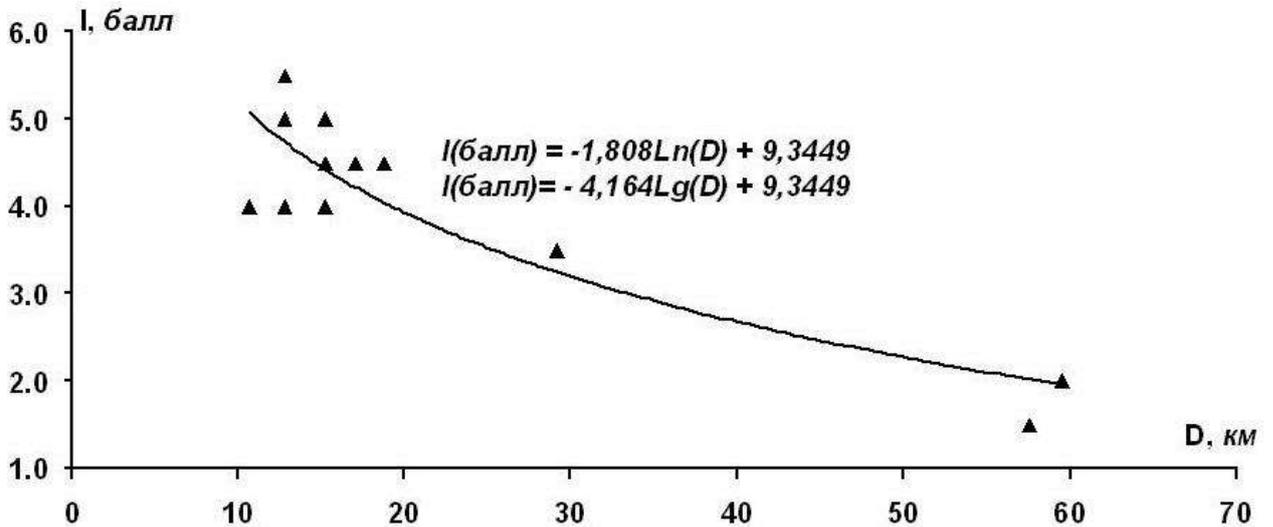


Рисунок 2.7. График затухания интенсивности сотрясений в зависимости от гипоцентрального расстояния D при землетрясении 13.09.2020 г. в 13:42 UTC. Вертикальная ось – интенсивность сотрясений в пунктах наблюдений. Приведены зависимости между интенсивностью сотрясений и гипоцентральной расстоянием

2.2.2. Афтершоковый процесс

По результатам сейсмического мониторинга, с использованием данных региональной сети сейсмических станций Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН, в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения 13 сентября 2020 г. было зарегистрировано 62 повторных толчка и определены их параметры, из них 70% – по данным только одной сейсмической станции «Углегорск» при фиксированном значении глубины очага. Параметры еще 17 афтершоков были определены более чем по 3 сейсмическим станциям. Самый сильный афтершок $M_L=4.6$ произошел спустя 27 мин после основного толчка на глубине 6 км. Его также ощутили жители Углегорского района, но уже с меньшей силой.

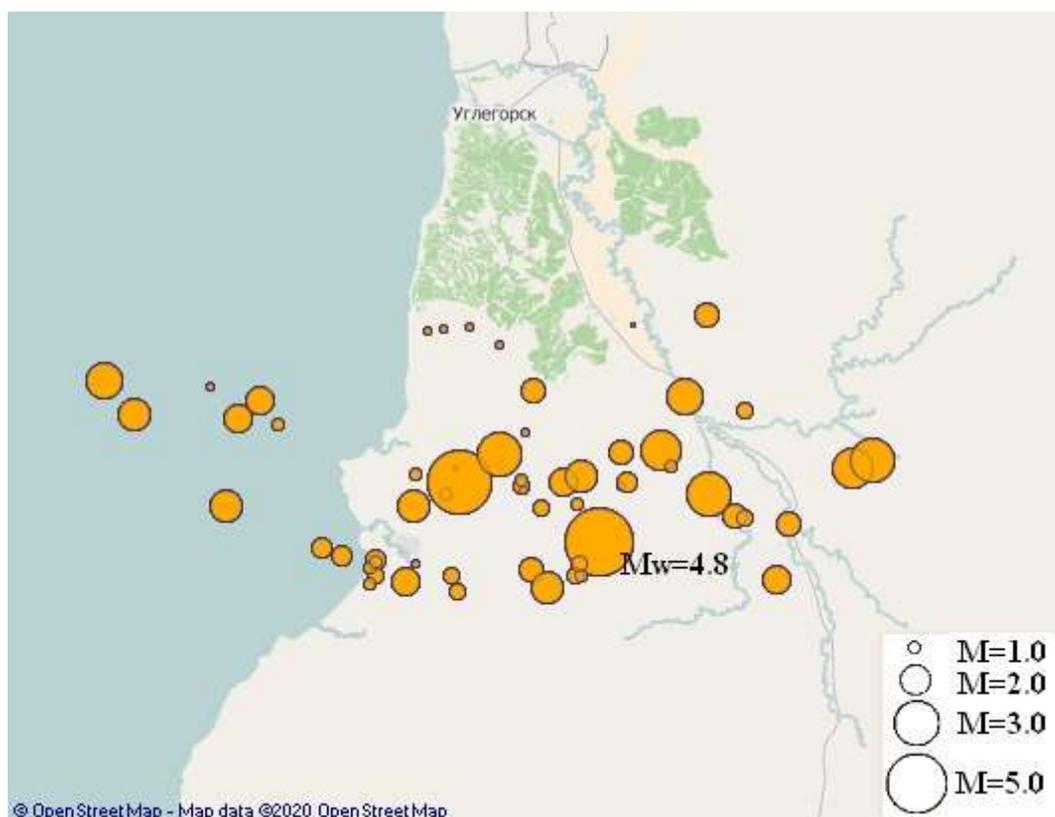


Рисунок 2.8. Карта афтершоков Углегорского землетрясения 13.09.2020 г. с $M_L=4.8$ по данным оперативной обработки в РИОЦ «Южно-Сахалинск»

Как видно из рисунка 2.8, зона афтершоков Углегорского землетрясения 13.09.2020 г. растянута в широтном направлении. Такое расположение эпицентров повторных толчков соответствует однонаправленной субмеридиональной конфигурации региональной сети сейсмических станций, которые расставлены вдоль острова на значительных расстояниях друг от друга и не могут в полной мере обеспечить надежное определение эпицентров возникающих землетрясений. Для качественного мониторинга сейсмичности требуется расстановка дополнительных пунктов сейсмических наблюдений в центральной и северной частях о. Сахалин.

Суммарно выделившаяся в результате Углегорского землетрясения 13.09.2020 г. и его афтершоков сейсмическая энергия была равна $5.64 \cdot 10^{12}$ Дж, энергия главного толчка составила более 77% (рисунок 2.9).

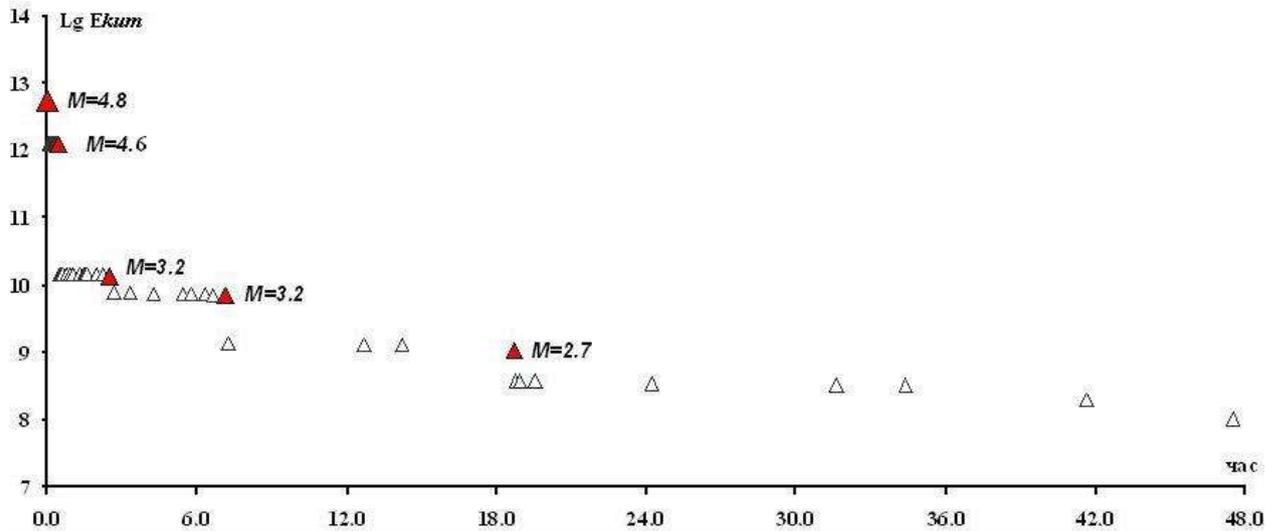


Рисунок 2.9. Распределение во времени суммарно выделившейся сейсмической энергии E_{kum} в результате Углегорского землетрясения 13.09.2020 г. с $M_L=4.8$ и его афтершоков (E_{kum} в логарифмическом масштабе). Красным треугольником выделены главный толчок и наиболее сильные афтершоки, зарегистрированные в эпицентральной зоне

Как можно наблюдать на рисунке 2.9, интенсивное выделение сейсмической энергии происходило в течение первых 7 ч, когда было зарегистрировано 45 афтершоков, из которых наиболее сильные отмечены на диаграмме: в 14:09 UTC ($M=4.5$), 16:12 UTC ($M=3.2$), 20:49 UTC ($M=3.2$) 13 сентября и в 08:24 ($M=3.2$) 14 сентября.

Для лучшего понимания природы Углегорского землетрясения 13.09.2020 г. выполнена оценка спада афтершоковой активности применительно к закону Утсу–Омори [Utsu, 1961; Utsu et al., 1995] (рисунок 2.10).

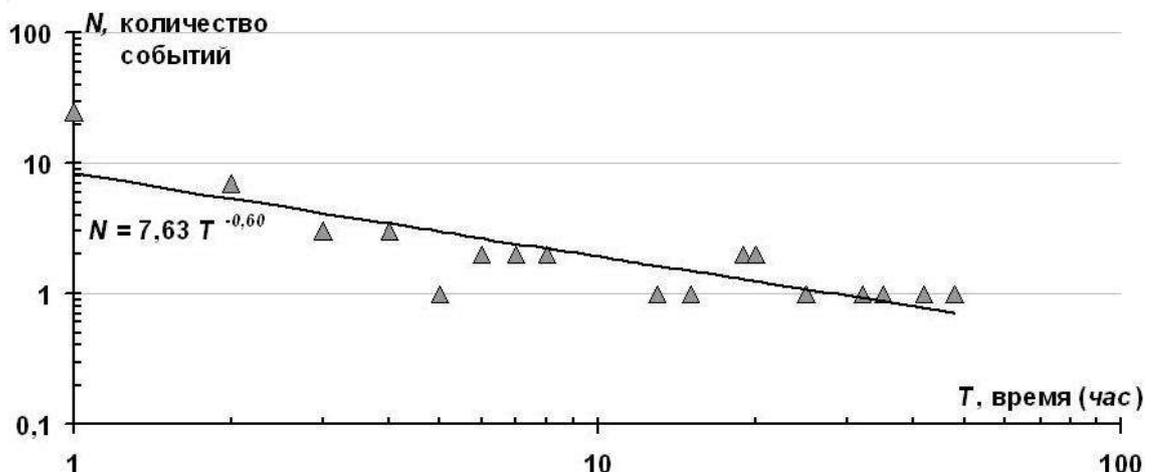


Рисунок 2.10. Тренд спада афтершокового процесса Углегорского землетрясения 13.09.2020 с $M_L=4.8$. Горизонтальная ось – логарифм времени от момента главного толчка, вертикальная –

логарифм числа зарегистрированных афтершоков. Треугольники – количество землетрясений, зарегистрированных в единицу времени. Данные аппроксимированы степенной зависимостью методом наименьших квадратов

Значение показателя степени $p \sim -0.6$ для афтершоков Углегорского землетрясения 13 сентября 2020 г. существенно отличается от показателей, характерных для естественной сейсмичности, полученных при исследовании афтершоковых процессов сахалинских землетрясений на интервале разных значений магнитуд [Семенова 2010; Семенова, Коновалов, 2011], и может являться одним из признаков техногенного влияния на сейсмический процесс [Адушкин, Турунтаев, 2015].

2.2.3. Приуроченность эпицентров к карьерам и оценка влияния на сейсмичность

При интерпретации причин возникновения событий сентября 2020 года в Углегорском районе обращает на себя внимание также приуроченность эпицентров землетрясений к месту проведения активной добычи бурого и каменного угля. Как было сказано выше, в настоящее время добыча угля в районе ведется открытым способом на нескольких участках, наиболее активно на Солнцевском угольном разрезе (СУР) Восточной горнорудной компании. Добыча угля здесь проводится на двух участках: Южный-I и Южный-II. Ещё в 1979-1981 гг. в результате поисково-разведочных, в частности каротажных работ, на участке Южный-I Сахалинская геологоразведочная экспедиция объединения Сахалингеология выявила осложняющие факторы для эксплуатации, такие как наличие в разрезе слабых пород, трещиноватость, способность пород к размоканию [Геологический отчет..., 1982]. В дальнейших геологических исследованиях района добычи также отмечалось наличие тектонических нарушений, в зоне которых устойчивость пород снижается.

Объемы добычи угля на Солнцевском угольном разрезе в период перед описываемым сейсмическим событием 2020 года неуклонно увеличивались. При этом пропорционально рос объем вскрышных работ. Так, только за 9 месяцев 2020 г., предшествующих землетрясению 13 сентября, на Солнцевском угольном разрезе перемещено 75.5 млн кубометров горной массы, а годом ранее – более 55 млн т (<http://miner.ru/info/2733/>). При проведении макросейсмического обследования поступали многочисленные жалобы от жителей сел Краснополя, Никольского, Медвежье Углегорского района о взрывных работах, сопровождающихся ударными волнами, от которых дребезжат стекла окон в домах, слышен сильный гул, пугающий население.

Всё перечисленное легло в основу заключения Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска

(протокол заседаний СФ РЭС № 1 от 06.10.2020 г.), где было принято решение о проведении детального мониторинга промышленных взрывов на угольных месторождениях [Закупин, 2021a]. В протоколе было отмечено, что установка, в дополнение к станциям региональной сети СФ ФИЦ ЕГС РАН [Костылев, 2018], трёх-четырёх короткопериодных сейсмометров в Углегорском районе должна способствовать более точной локализации проводимых взрывов, оценке их воздействия на ближайшие населенные пункты, проведению полноценного мониторинга слабой сейсмичности. На момент сейсмических событий 2020 года СФ ФИЦ ЕГС РАН проводила мониторинг сейсмичности Углегорского района, в том числе промышленных взрывов, региональной сетью станций, включая сейсмическую станцию «Углегорск». По результатам этого мониторинга была проанализирована динамика изменения частоты и характера взрывов, зарегистрированных в координатах 48.7–49.5° с.ш. и 141.7–142.5° в.д., и проведено их сопоставление с сейсмичностью в том же районе (рисунок 2.11).

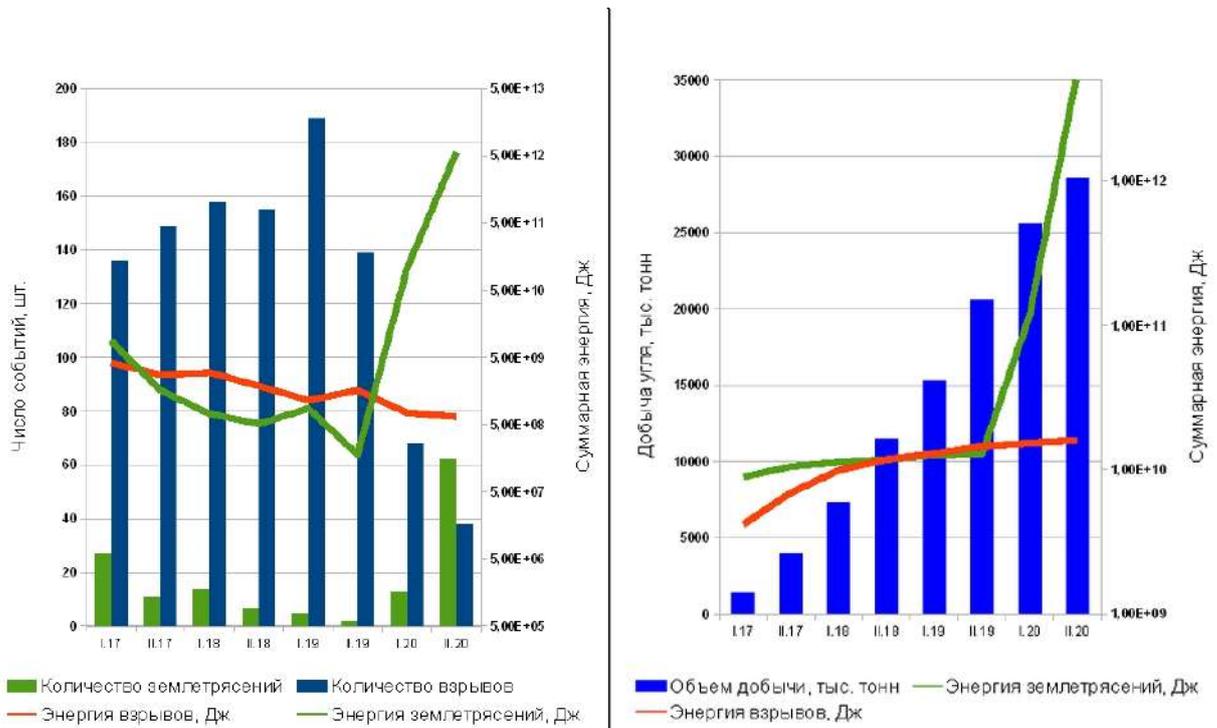


Рисунок 2.11. Сопоставление количества и мощности промышленных взрывов и сейсмичности района в период I.2017 – IX.2020 с полугодовым интервалом (слева) и накопительного роста объемов добычи угля на СУР с накоплением энергии взрывов и сейсмических событий за тот же период (справа)

Обращает на себя внимание тот факт, что при уменьшении общего количества зарегистрированных взрывов с конца 2019 г. их суммарная энергия практически не изменилась, что говорит о возросшей мощности каждого отдельного взрыва. Также можно отметить, что к

концу 2019 г. суммарная энергия взрывов, произведенных на участке исследования с 2017 г., превысила суммарную энергию от сейсмических событий за тот же период времени. При этом с начала 2020 г. отмечается рост сейсмичности в данном районе (рисунок 2.11).

Таким образом, полученные результаты явились мотивом для проведения более детального анализа изменения сейсмичности района в период 2000-2020 гг.

2.3 Методы и результаты исследования динамики изменения сейсмичности района угледобычи

Для исследования [Kostylev et al., 2022] изменения сейсмичности района, в условиях активизации добычи полезных ископаемых открытым способом, использован каталог землетрясений Сахалинского филиала Федерального Исследовательского Центра «Единая Геофизическая Служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) с 2000 по 2020 годы [например, Фокина и др., 2021] в квадрате 48.4° - 49.4° северной широты и 141.7° - 142.4° восточной долготы, включающем как тектонические активные структуры, так и территории закрытых шахт и участки интенсивно разрабатываемых открытых угольных месторождений (прежде всего Солнцевский Угольный разрез).

Для анализа каталога использован программный комплекс ZMAP [Wiemer, 2001], при помощи которого была проведена декластеризация каталога с применением алгоритма [Gardner, Knoroff, 1974], для исключения влияния афтершоковых последовательностей землетрясений 2000 и 2020 годов на графики повторяемости и карты положения эпицентров для оценки сейсмичности.

Результат динамики изменения сейсмичности указанного района за 20 лет, после проведения декластеризации, представлен на рисунке 2.12.

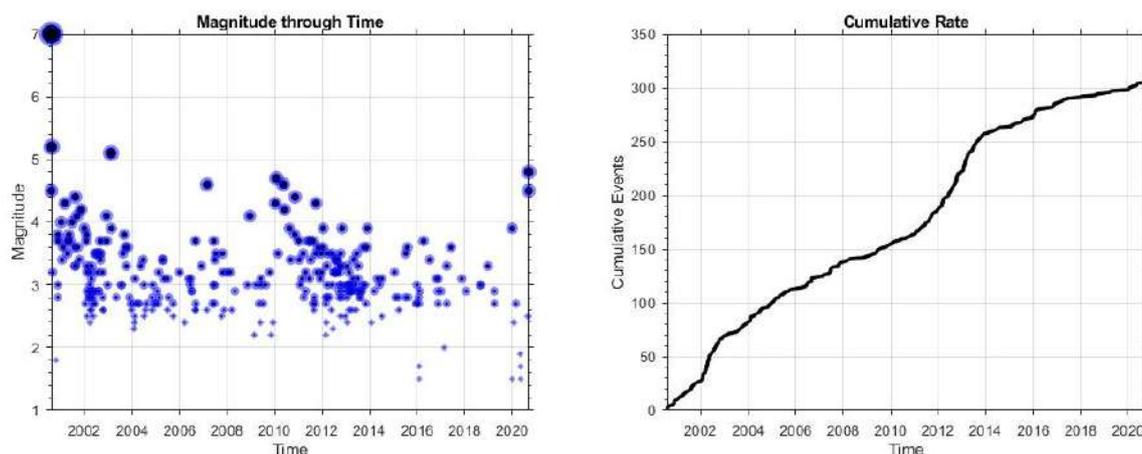


Рисунок 2.12. Динамика изменения сейсмичности района исследования в 2000-2020 годах. Распределение магнитуд землетрясений по годам (слева) и кумулятивный график (справа)

Обращает внимание усиление сейсмичности района в 2012-2013 годах, что совпадает с началом активной разработки Солнцевского Угольного Разреза и, соответственно, значительным увеличением объемов вскрышных работ на разрезе в этот период. Для сравнения характеристик сейсмического режима исследуемой области были построены графики повторяемости [Kostylev et al., 2022] за первое и второе (в период активного освоения Солнцевского Угольного разреза) десятилетия (рисунок 2.13). Отличие угла наклона графика повторяемости в период 2011-2020 годов – довольно значимое. Увеличение угла наклона означает большее количество землетрясений малых энергий в общем числе событий. Согласно [Yakovlev, 2013; Еманов А.Ф. и др., 2020] такие значения b -value (около 1.0) свойственны техногенным активизациям в районах с наведенной сейсмичностью. Для сравнения на графике слева (рисунок 2.13) показаны значения b -value свойственные природной сейсмичности.

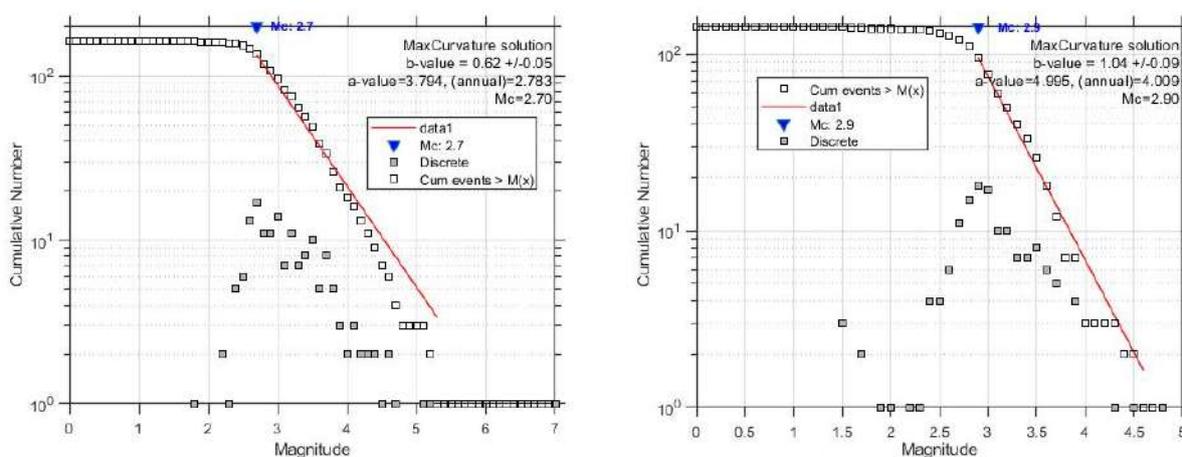


Рисунок 2.13. Графики распределения частоты землетрясений по магнитуде за 2000-2010 годы (слева) и 2011-2020 годы (справа)

Не менее интересно изучить [Kostylev et al., 2022] изменения пространственного распределения эпицентров землетрясений в период 2000-2010 и 2011-2020 годов (рисунок 2.14).

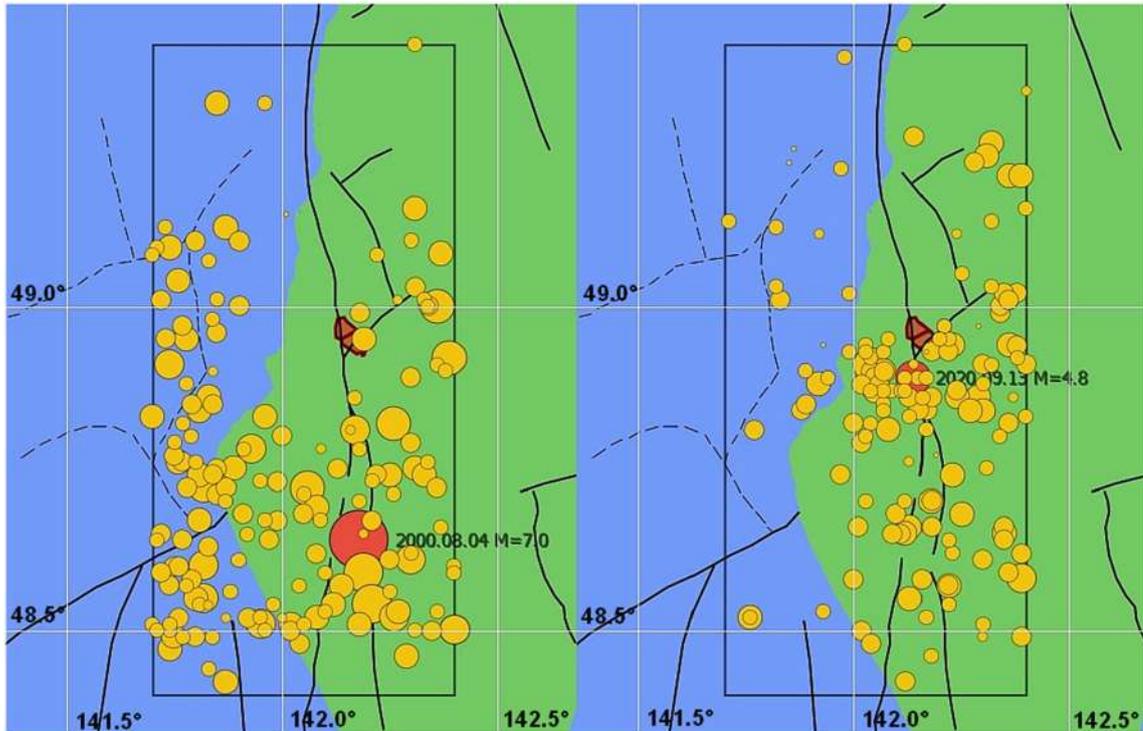


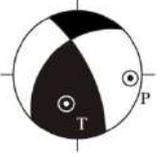
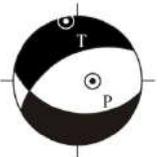
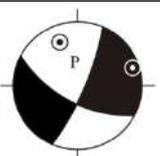
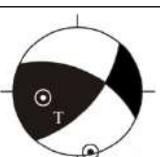
Рисунок 2.14. Эпицентры землетрясений в 2000-2010 годах (слева) и 2011-2020 (справа). Выделен (красный полигон) участки Солнцевского угольного разреза и сильнейшие землетрясения каждого десятилетия (красный цвет)

Как видно, расположение эпицентров сейсмических событий в период 2000-2010 годов (слева на рисунке 2.14) приурочено преимущественно к разломным структурам, что подтверждает активность Краснополевского разлома - составной части Западно-Сахалинского глубинного разлома в этот период [Прытков, Василенко, 2006]. Во второе десятилетие 21 века при сохранении активности разлома, происходит стягивание зон концентрации сейсмособытий к местам ведения горных работ, прежде всего к Солнцевскому угольному разрезу (справа на рисунке 2.14). Подобное сочетание позволяет говорить об усилении сейсмичности района в последние годы и изменении её характера от естественной к смешанной природно-техногенной сейсмичности

В качестве подтверждения изменения характера сейсмичности и причин возникновения землетрясений в районе исследования необходимо обратить внимание на сейсмодислокации крупнейших землетрясений первого (землетрясение 2000 года) и второго (землетрясение 2020 года) десятилетий. Механизмы очага землетрясения 2000 года и самых сильных его

афтершоков определены в работе [Поплавская и др., 2011] как взбросы (либо сбросы), что является характерным для большинства землетрясений, происходящих на территории острова Сахалин. Подвижка в очаге землетрясения 13 сентября 2020 года и его крупнейшего афтершока ($M_L=4.5$) реализовалась в условиях горизонтального субширотного растяжения и близгоризонтального субмеридионального сжатия и квалифицируется как сдвиг [Семенова и др., 2020]. Учитывая, что Западно-Сахалинский разлом проявляется в виде системы взаимосвязанных сбросов и взбросов, тип сейсмодислокаций землетрясений сентября 2020 года является явно нехарактерным для исследуемой области. Конфигурация афтершоков землетрясения 13 сентября 2020 года с их субширотной ориентацией указывает на влияние горных работ (перемещение пород при вскрышных работах), как возможного триггерного эффекта, повлиявшего на возникновение этого землетрясения. Таким образом, можно провести параллель с сильнейшими техногенными землетрясениями на Кольском полуострове, где установлено, что сдвиговый характер смещений в очагах землетрясений обусловлен действующими в массивах большими тектоническими напряжениями, наличием тектонических нарушений и пустот, образовавшихся в процессе подготовки и выемки рудных залежей [Ловчиков, 2011]. Также, существование заметной разницы в механизмах очага между землетрясениями, вызванными горными работами и природными землетрясениями региона, отмечалось в исследованиях землетрясений в районе крупнейшего в Азии угольного разреза (Фушунь, Китай) [Li Tie et al., 2005]. Для получения дополнительной информации о характере землетрясений в исследуемом районе авторами, с помощью вычислительного модуля FOCMEC, интегрированного в комплекс сейсмологических программ SEISAN [Ottemöller et al., 2011], был выполнен расчет механизма сейсмического события того же 2020 года, произошедшего 03 января (20:46) с $M=3.9$. Всего было использовано 19 знаков вступлений первых движений *P*-волны, зарегистрированных на вертикальной компоненте записи сейсмических колебаний. В соответствии с полученным решением типом сейсмодислокации явился сброс, что в целом соответствует взбросо-сбросовой сейсмичности района [Дымович и др., 2017]. Обобщенные расчеты механизмов всех землетрясений представлены в таблице 2.4.

Параметры механизмов очагов землетрясений

№	Дата / Время	Магни- туда	Оси главных напряжений				Нодальные плоскости						Тип сейсмо- дислокации	Стереограмма механизмов (нижняя полусфера)
			<i>T</i>		<i>P</i>		<i>NP1</i>			<i>NP2</i>				
			<i>PL</i>	<i>Az</i>	<i>PL</i>	<i>Az</i>	<i>PL</i>	<i>Az</i>	<i>PL</i>	<i>Az</i>	<i>PL</i>	<i>Az</i>		
1	2000- 08-04 21:13	M=7.0	46	201	16	94	225	45	154	334	72	48	Взброс	
2	2020- 01-03 20:46	M=3.9	5	349	69	92	100	44	-60	242	53	- 115	Сброс	
3	2020- 09-13 13:42	M=4.8	9	72	24	338	23	80	-24	118	66	- 169	Сдвиг	
4	2020- 09-13 14:09	M=4.5	41	260	3	168	41	65	33	295	60	150	Сдвиг	

Дальнейшее рассмотрение особенностей сейсмических процессов в исследуемом районе в последнее десятилетие будет проводиться с учетом воздействия на геосреду промышленных взрывов, проводимых на Солнцевском угольном разрезе при ведении вскрышных работ [Kostylev et al., 2022]. Как уже было указано выше, мониторинг и регистрация таких взрывов производится СФ ФИЦ ЕГС РАН с использованием оборудования сейсмической станции «Углегорск», расположенной в непосредственной близости от территории Солнцевского Угольного разреза. Станция «Углегорск» оснащена современным цифровым оборудованием фирмы Guralp: широкополосным сейсмометром GuralpCMG-6T и акселерометром CMG -5TD [Мишаткин и др., 2011]. Ежегодно фиксируются более 100 взрывов, производимых на разрезе. Методики, используемые СФ ФИЦ ЕГС РАН для идентификации и детерминирования взрывов, в общем случае, не вызывают затруднений и подробно описаны [Морозов, 2008; Асминг и др., 2010]. В качестве критериев разделения взрывов и землетрясений обычно рассматривается отношение амплитуд продольных и поперечных волн (P/S), отношение продольных и поверхностных волн (Pg/Lg), форма записи, знаки первых вступлений, наличие поверхностной волны. Кроме перечисленных критериев, во многих исследованиях показано, что наиболее

информативным является спектрально-временной анализ сейсмограмм записей взрывов и землетрясений [Добрынина, Герман, 2016]. Установлено, что исследованные взрывы характеризуются более низкочастотным излучением по сравнению с землетрясениями. Другими авторами анализ спектрограмм локальных сейсмических событий, зарегистрированных в районах с техногенным воздействием на геосреду, направлен не только на идентификацию взрывов, но и на дискриминацию техногенных и тектонических сейсмических событий. В частности, отмечается, что спектры записи техногенных землетрясений обычно находятся в полосе частот до 7 Гц, а частота максимума спектральной плотности равна 2-3 Гц, что обычно ниже, чем у тектонических землетрясений [Андрущенко и др., 2012]

В этой связи, ниже предпринята попытка определить закономерности параметров производимых взрывов и землетрясений через динамические параметры очагов сейсмических событий. Был исследован частотный состав землетрясений и взрывов (в период с 2015 года по 2020 год) с целью определения угловой частоты (F_c) из очагового спектра скорости (рисунок 2.15).

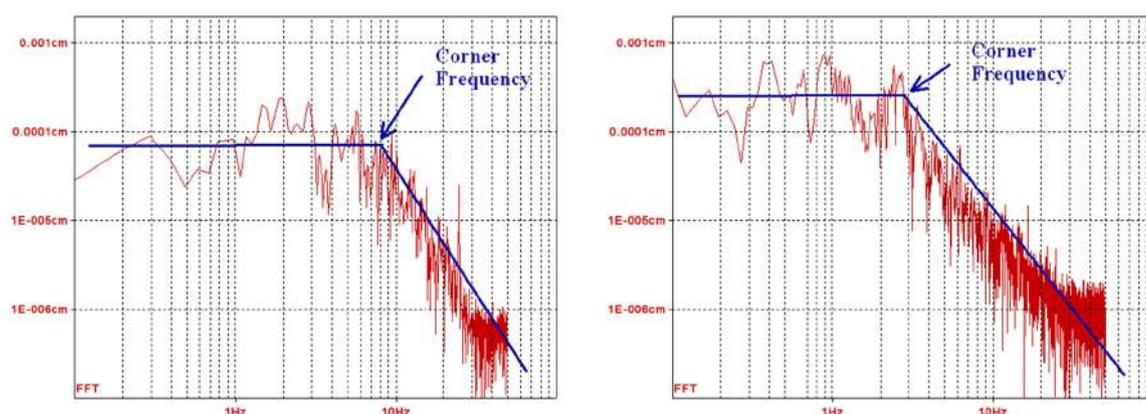


Рисунок 2.15. Пример определения значения угловой частоты для спектра скорости по данным с/ст «Углегорск» для землетрясений (слева) и взрывов (справа)

Известно [Dobrynina, 2009], что изучение очаговых параметров землетрясений (в том числе угловой частоты), позволяет лучше понять природу процессов аккумуляции и разрядки тектонических напряжений в сейсмоактивных регионах. Были получены зависимости между очаговыми параметрами и локальной магнитудой. Результаты представлены в таблице 2.5. Отдельно был проведен расчет угловой частоты для 100 произвольно выбранных взрывов. По результатам расчета установлено, что для взрывов значения угловой частоты находятся в пределах 1.0-3.0 Гц.

**Зависимость между магнитудой, угловой частотой и удаленности от сейсмической станции
для землетрясений 2015-2020 гг.**

№	Год	Месяц	День	Час	Минута	Широта, °	Долгота, °	Глубина, km	Магнитуда	Угловая частота (Fc), Гц	Расстояние до сейсмической станции, км
1	2015	Январь	18	8	51	48.65	142.11	10	3.2	2.5	37.7
2	2015	Февраль	1	2	21	49.02	141.99	15	2.8	5	9.8
3	2015	Март	19	13	5	49.21	141.97	10	2.8	5.5	15.9
4	2015	Март	28	3	23	48.95	142.08	10	2.6	3	11.2
5	2015	Июль	5	17	18	48.81	142.17	7	2.8	5.5	26.1
6	2015	Июль	10	15	56	48.57	142.22	5	3.5	8	47.6
7	2015	Август	6	4	40	48.55	142.13	11	3.6	3.5	46.7
8	2015	Август	20	11	31	49.4	142.12	9	2.8	6.5	29.1
9	2015	Декабрь	17	16	34	48.8	142.03	10	2.7	5	24.5
10	2015	Декабрь	21	7	27	48.92	142.04	10	2.7	5.5	14
11	2015	Декабрь	28	10	15	48.66	142.18	10	3	7	38.7
12	2016	Январь	22	9	38	48.93	142.07	10	2.8	6	12.8
13	2016	Январь	31	3	16	48.94	142.03	10	2.7	5.5	12.6
14	2016	Февраль	1	21	55	48.97	142.29	12	1.7	6	26.6
15	2016	Февраль	2	9	27	48.93	142.17	8	1.5	6	17.3
16	2016	Февраль	5	9	41	48.97	142.21	10	2.9	5.5	18.5
17	2016	Апрель	8	12	36	48.65	142.35	8	3.7	5.5	49
18	2016	Июль	11	8	35	49.01	142.36	12	3.4	3	33.2
19	2016	Октябрь	22	8	56	48.64	142.35	10	3.1	6	49.6
20	2016	Ноябрь	11	2	55	48.84	142.07	10	2.9	6	20.7
21	2016	Ноябрь	18	8	57	48.53	141.93	10	2.7	6	50.2
22	2016	Ноябрь	19	2	57	48.62	142.39	10	3.1	6	53.9
23	2017	Январь	4	16	59	48.87	142.04	10	2.9	8	18.3
24	2017	Февраль	24	1	31	49.33	142.4	10	2	3.5	43.3
25	2017	Апрель	1	17	38	49.01	141.83	11	3.3	6	26.9
26	2017	Апрель	2	20	55	49.15	142.4	6	2.7	9	37.7
27	2017	Январь	6	23	50	48.94	142.23	14	3.6	6	21.8
28	2017	Ноябрь	16	21	52	48.65	142.09	10	3.1	6	37.5
29	2018	Январь	27	17	19	48.46	142.18	8	2.9	7	55.5
30	2018	Август	27	17	58	48.59	142.36	12	3	5.5	53.8
31	2018	Сентябрь	3	2	34	48.58	142.16	13	3	8	44.8
32	2018	Декабрь	22	23	51	48.66	142.35	12	3.3	7	48.3
33	2019	Апрель	1	17	54	48.91	142.32	3	2.9	10.5	31.8
34	2019	Апрель	3	8	39	48.7	142.12	8	2.7	7	33.6
35	2020	Январь	3	20	46	48.88	141.92	6	3.9	5.5	23.7
36	2020	Январь	4	11	47	48.94	141.93	10	1.5	9.5	19.3
37	2020	Январь	27	17	41	48.49	142.3	5	2.4	9	57.7
38	2020	Май	6	2	17	49.24	141.86	5	1.9	10.5	27
39	2020	Май	11	23	15	48.77	142.19	5	1.7	10.5	30.2
40	2020	Май	12	18	41	49.22	141.85	5	1.5	10.5	27.1
41	2020	Сентябрь	5	14	10	48.83	142.4	11	2.5	10.5	43
42	2020	Сентябрь	13	13	42	48.89	142.14	8	4.8	2.5	18.3
43	2020	Сентябрь	13	14	9	48.91	142.04	6	4.5	3	14.9

Полученные значения и построенный по этим данным график тренда зависимости частоты от магнитуды (синяя линия на рисунке 2.16А) в целом соответствует работам [Сычева, 2017; Dobrynina, 2009]. В то же время, очевидно, что несколько сейсмических событий находятся явно ниже линии тренда. Их можно определить как «аномальные» землетрясения (на графике они выделены красным цветом, и для них указаны номера из таблицы). В этот же список входит и землетрясение 13 сентября 2020 г., а также его главный афтершок (события № 42 и № 43 в таблице).

При рассмотрении позиций эпицентров этих «аномальных» землетрясений (рисунок 2.16В) практически полностью соответствует распределению облака афтершоков сейсмического события 13 сентября 2020 года. Кроме того, эти события, будучи при этом приуроченными к разломным структурам, также находятся в непосредственной окрестности Солнцевского угольного разреза.

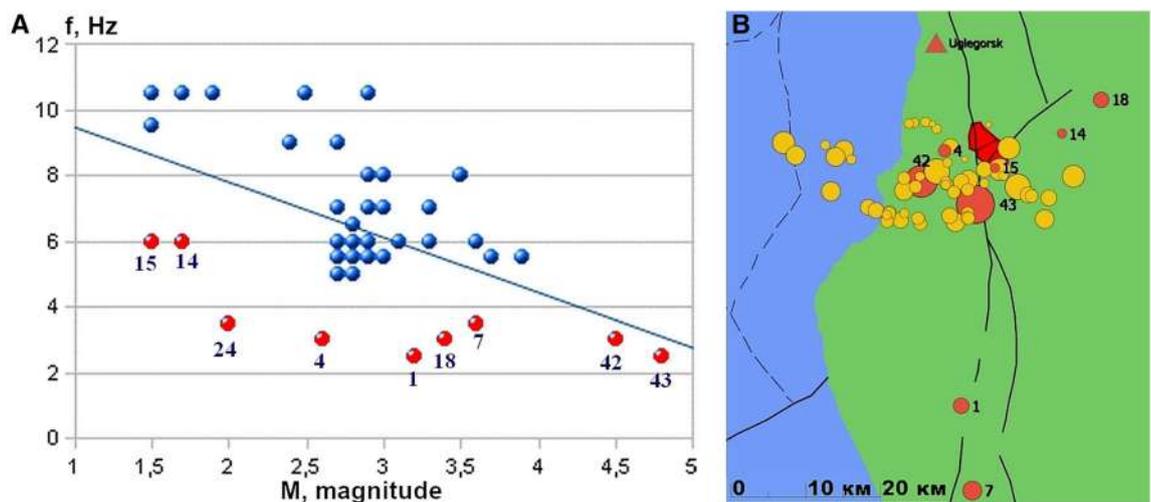


Рисунок 2.16. А: График зависимости угловой частоты (ось Y) от магнитуды события (ось X). В: Распределение эпицентров «аномальных» землетрясений 2015–2020 гг. (красные кружки) и положение афтершокового облака землетрясения 13 сентября 2020 г. (желтые кружки). Размер кружков соответствует величине магнитуды (M_L) от 0.2 до 4.8

Таким образом, методика оценки природы сейсмических событий через изучение зависимости угловая частота - магнитуда, позволяет выделить, как сейсмические события тектонического характера (например, № 35 механизм которого был построен выше и соответствует представлениям о характере проявлений сейсмичности данного района), так и сейсмические события потенциально техногенного происхождения, предположительно,

имеющие сдвиговый характер механизмов. Для подтверждения данного предположения необходимо создание локальной сейсмической сети в районе исследования.

Кроме Солнцевского месторождения, в районе действуют лицензии на добычу угля и на других участках, где ведется или планируется добыча открытым способом – Константиновском и Соболевском. Также в районе находятся разрабатываемые длительное время каменные карьеры строительных материалов – месторождения Эхминское месторождение андезитов и Никольское месторождение базальтов. Такое количество участков активной разработки недр на небольшой (20×20 км) площади делает особо важным проведение детального мониторинга данного участка, для чего необходимо размещение дополнительных сейсмических станций. На рисунке 2.17 приведена карта с действующими и планируемыми участками разработки полезных ископаемых, а также объекты, на которых ранее такая добыча проводилась [Аракчеев и др., 2021]. На рисунке выделены потенциальные пункты размещения дополнительных станций, выявленные во время проведения макросейсмического обследования в сентябре 2020 года.

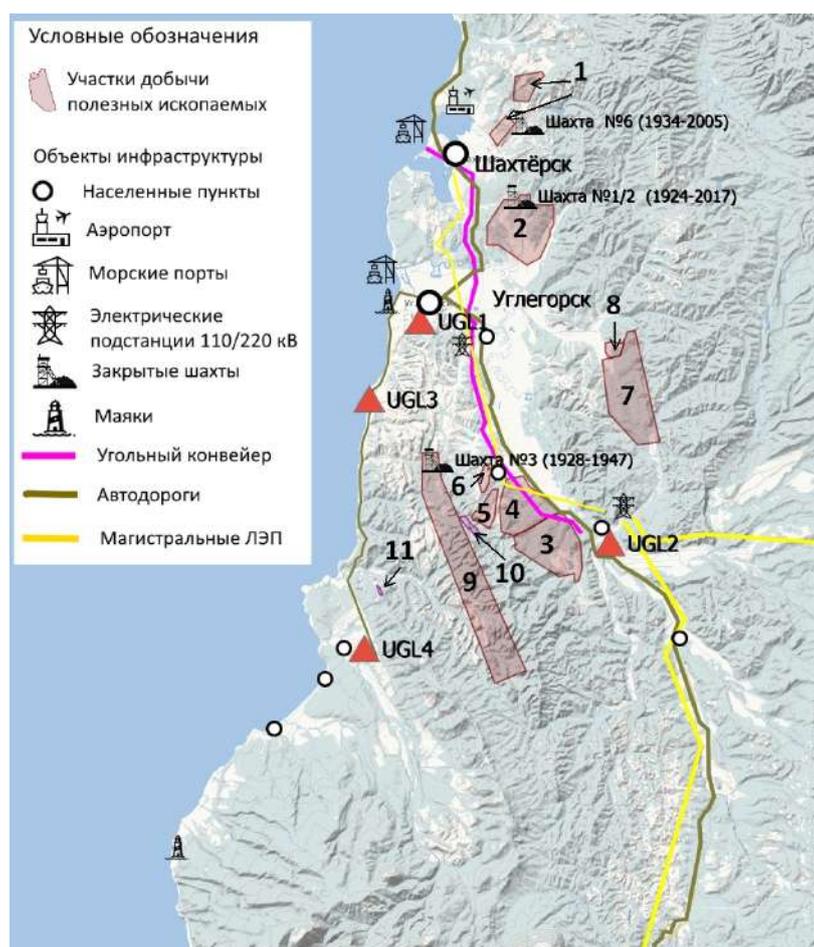


Рисунок 2.17. Перечень участков разработки полезных ископаемых: 1 - Поле шахты «Углегорская (№6)», 2 - Поле шахты «Ударновская (№1/2)», Солнцевское угольное месторождение: 3 - участок Южный I, 4 - участок Южный II (оба - ООО «Солнцевский»)

угольный разрез)), 5 - участок Центральный (ЮВ часть) (ООО «Никольскуголь»), 6 - участок Центральный-бис (освоен) (ООО «Углегорскуголь»), Константиновское угольное месторождение: 7 - участок Юбилейный (план) (АО «Крокус»), 8 - участок Крутоярский (ООО «Западная угольная компания»), 9 - Соболевское каменноугольное месторождение (план) (ООО УК «Угольные ресурсы Сахалина»), 10 - Никольское месторождение базальтов (ООО «Никольский камень»), 11 - Эхминское месторождение андезитов (ГУП «Углегорское ДРСУ»)

Кроме того, в районе со столь активным антропогенным воздействием располагаются многочисленные объекты инфраструктуры Сахалинской области, также представленные на рисунке 2.17. Это, как существующие транспортные и энергетические линии (автодороги, порты, аэропорт, ЛЭП), так и новые проекты, среди которых крупнейший в РФ угольный конвейер протяженностью 23 км, запуск которого запланирован на 2023 год. Этот конвейер станет самым протяженным в России и будет использоваться для транспортировки сырья с Солнцевского угольного разреза до Угольного морского порта Шахтерск, с расчётной производственной мощностью транспортировки до 20 млн тонн в год. Кроме того, готовится строительство крупнейшего на Дальнем Востоке РФ, в состав которого войдут 16 ветротурбин, расположенных на участках с высоким потенциалом ветра [Лимаренко, 2022].

Всё это является ещё одним дополнительным фактором определяющим необходимость детального сейсмического мониторинга данного района.

Выводы по главе 2

В главе изучена динамика изменения сейсмичности района активной добычи полезных ископаемых на Сахалине в условиях изменения способов добычи и интенсификации воздействия на недра, связанные с увеличением объемов извлекаемых полезных ископаемых и перемещаемых горных масс.

Рассмотрен ряд классических индикаторов для выделения в характере сейсмичности техногенной компоненты, каждый из которых указывает на изменения в сейсмическом режиме в районе добычи углеводородов за последнее десятилетие. Наличие дополнительных признаков техногенной сейсмичности (изменение характера наклона графиков повторяемости и механизмов землетрясений, миграция эпицентров землетрясений и пр.) позволяет говорить о переходе от естественной сейсмичности к смешанной природно-техногенной сейсмичности в Углегорском районе Сахалина.

В этой связи детально изучен сейсмический процесс Углегорского землетрясения 13 сентября 2020 года, его особенности и макросейсмические проявления. На основании полученных результатов сделаны выводы, что землетрясение 13 сентября 2020 года можно отнести к особому виду сильных природно-техногенных землетрясений триггерного характера.

На основании полученных результатов обоснована целесообразность организации специальной программы детальных исследований природы сейсмических процессов в недрах района и выявления признаков нарастания природно-техногенной сейсмической активности. Данная программа должна включать, в частности, создание сейсмической локальной сети вокруг территории Солнцевского угольного разреза и объектов инфраструктуры района.

ГЛАВА 3. ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ СБОРА СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В САХАЛИНСКОМ ФИЛИАЛЕ ФИЦ ЕГС РАН²

3.1. Основные этапы создания и развития сети сейсмического мониторинга Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН

На территориях Сахалинской области, Приморского края, Хабаровского края, Амурской области, а также северо-западной части Тихого океана, акваторий Охотского и Японского морей выполнение задач по сейсмическому мониторингу обеспечивает Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН). Кроме этого, СФ ФИЦ ЕГС РАН выполняет работы по

²При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Kostylev D.V.**, Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.. – 2019. – No. 324 (012009). – DOI 10.1088/1755-1315/324/1/012009. (0,88 п.л., вклад автора 40%, импакт-фактор SJR – 0,199)
2. Ichiyanagi M., Takahashi H., Mikhaylov V., **Kostylev D.**, Levin Y. Evaluation for hypocenter estimation error in the southwestern Kuril trench using Japan and Russia joint seismic data // Earth, Planets and Space. – 2020. – Vol. 72, No. 1. – P. 86. – DOI 10.1186/s40623-020-01215-0. (0,88 п.л., вклад автора 25%, импакт-фактор JCI – 0,800)
3. Закупин А.С., Дудченко И.П., Богинская Н.В., **Костылев Д.В.**, Каменев П.А. Изучение сейсмического режима на острове Матуа в комплексной экспедиции 2017 г. // Вестник ДВО РАН. – 2018. – № 1. – С. 161-167. (ИФ РИНЦ: 0,350. 0.88 п.л., авторский вклад 20%).
4. Семенова Е.П., **Костылев Д.В.**, Михайлов В.И., Паршина И.А., Ферчева В.Н. Оценка сейсмичности южного Сахалина по методике СОУС'09 // Геосистемы переходных зон. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 191-195. – DOI 10.30730/2541-8912.2018.2.3.191-195. (ИФ РИНЦ: 0,806. 0.63 п.л., авторский вклад 30%).
5. Каменев П.А., **Костылев Д.В.**, Богинская Н.В., Закупин А.С. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 390-402. – DOI 10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402. (ИФ РИНЦ: 0,806. 1.63 п.л., авторский вклад 30%).
6. Сафонов Д.А., **Костылев Д.В.**, Фокина Т.А., Коваленко Н.С. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 146-159. – DOI 10.30730/grz.2020.4.2.146-159. (ИФ РИНЦ: 0,806. 1.75 п.л., авторский вклад 30%).
7. **Костылев Д.В.** Формирование единой системы сбора сейсмологической информации в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 1. – С. 41-53. – DOI 10.35540/2686-7907.2021.1.03. (ИФ РИНЦ: 1,150. 1.63 п.л., авторский вклад 100%).
8. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., **Костылев Д.В.** Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2018-2019 гг // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – № 26(2018-2019). – С. 154-170. – DOI 10.35540/1818-6254.2023.26.13. (ИФ РИНЦ: 0,732. 2.13 п.л., авторский вклад 33%).

функционированию системы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке. В свете этих задач, а также высокой сейсмичности района, первоочередной целью развития сейсмометрических наблюдений для Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН является создание и поддержание сети цифровых сейсмических станций, решающих задачи, как локального, так и регионального мониторинга, и объединенных в единое информационное поле.

Автором за последние годы проведены значительные работы по формированию и развитию сейсмической сети и системы сбора сейсмологических данных в Сахалинском филиале [Костылев, 2016; Костылев и др., 2017а; Костылев, 2021а].

Началом создания сети сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН можно считать 25 октября 1947 года, когда сейсмическая станция «Южно-Сахалинск» была принята Сахалинской базой АН СССР [Спирин, Левин, 2008]. В дальнейшем сеть стационарных станций СФ ФИЦ ЕГС РАН, оснащенных аналоговым оборудованием, активно развивалась до 1990х годов, после чего, с одной стороны, из-за недостаточного финансирования, были закрыты ряд станций сети, а с другой стороны, в этот период начался активный переход на цифровую технологию производства наблюдений, который завершился в СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2015 году, когда 30 сентября 2015 году в СФ ФИЦ ЕГС РАН были полностью прекращены сейсмологические наблюдения аналоговыми регистраторами.

С переходом на цифровые методы регистрации сейсмических событий особо актуальным стало объединение данных, получаемых на сейсмических станциях в единую систему сбора и мониторинга. Развитие региональных сетей сбора сейсмологической информации на Дальнем Востоке в начале XXI века шло прежде всего в рамках международных проектов по научно-техническому сотрудничеству и федеральных целевых программ «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в РФ до 2010 года» и «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2015 года».

Так, для СФ ФИЦ ЕГС РАН, первым шагом на пути перехода к цифровым технологиям в наблюдательной сейсмологии стало участие в международной программе создания глобальной сети цифровых станций IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology), когда в глобальную сеть цифровых станций (GSN), созданную в 1986 году [Gee, Leith, 2011] были включены 12 станций на территории Российской Федерации [Развитие сейсмологических наблюдений...2010] и в том числе сейсмическая станция «Южно-Сахалинск» [Hutt, 1993]. Цифровое оборудование на станции «Южно-Сахалинск» было установлено в 1992 году в рамках соглашения между Консорциумом университетов IRIS и Академией наук СССР

[Старовойт, Чернобай, 1994]. В 2005 году на Дальнем Востоке было начато создание цифровой сети сейсмологических наблюдений с использованием комплексов, полученных от иностранных партнеров по проектам «Исследования сейсмоструктуры Охотоморской плиты» между Сообществом Университетов Японии, Геофизической службой РАН и Институтами Российской академии наук от 17 января 2005 г. В рамках проекта в 2005-2007 годах на станциях «Оха», «Тымовское» (Сахалинская область), «Хабаровск», «Горный», «Охотск» (Хабаровский край), «Терней», «Горнотаёжное» (Приморский край) и «Зея» (Амурская область) были установлены регистрирующие комплексы Datamark и широкополосные высокочувствительные сейсмометры. Установленные на Курильских островах цифровые станции «УГРА» [Корсунцев, 2008] были включены в систему сбора, созданную специалистами Центрального отделения ГС РАН на базе транспортной системы, применяющейся в ГС РАН – Near Real Time System (NRTS) [Davis et al., 1999]. Для этого на сейсмической станции «Южно-Сахалинск» в 2008 году была проведена установка системы NRTS и был организован сервер с «дисковой петлёй» [Красилов, Семенов, 2007] непрерывно поступающих и обновляемых данных от станций «Угра» и станций сети GSN на Дальнем Востоке. Наибольший прогресс в развитии цифровых станций и соответствующих им систем сбора данных в СФ ФИЦ ЕГС РАН был достигнут в рамках реализации федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года», когда в 2008-2011 годах в СФ ФИЦ ЕГС РАН была создана сейсмическая подсистема Службы предупреждения Цунами (СП СПЦ), использующая в качестве системы сбора данных разработки Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН [Чебров, 2013]. В результате, к 2012 году в СФ ФИЦ ЕГС РАН в эксплуатации оказались фактически три несвязанных между собой системы сбора сейсмологических данных, каждая из которых объединяла станции с различными форматами данных, причем зачастую на одной и той же станции использовались различные, несовместимые между собой и недоступные для обработки сейсмические данные.

Цифровое регистрирующее оборудование, установленное на станциях сети СФ ФИЦ ЕГС РАН в рамках выполнения работ по перечисленным выше проектам, было также неоднородно прежде всего по используемым форматам данных и протоколам передачи информации. Так, оборудование, установленное по программе сотрудничества с Университетами Японии по проектам «Исследования сейсмоструктуры Охотоморской плиты» включало в себя современные регистрирующие комплексы Datamark в составе широкополосного высокочувствительного сейсмометра STS-2 фирмы G.Streckeisen AG (Швейцария), узкополосного сейсмометра пониженной чувствительности L4C-3D фирмы Sersel

Inc. (США) и регистратора Datamark LS7000XT фирмы Nakusan Corporation (Япония) [Miyamachi et al., 2009], но использование традиционной для сейсмических сетей Японии системы сбора и обработки данных WIN [Urabe, Tsukuda, 1992] затрудняло применение получаемых данных для их анализа.

Введенная в опытную эксплуатацию в 2008 году первая очередь сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами, в рамках которой были созданы три региональных информационно-обрабатывающих центра (РИОЦ) Геофизической службы РАН («Петропавловск-Камчатский», «Южно-Сахалинск», «Владивосток») и сеть сейсмологических наблюдений, состоящая из опорных и вспомогательных станций, а также пунктов регистрации сильных движений были оснащены оборудованием, установленным в рамках реализации программы по созданию СП СПЦ. Работа и оснащение таких станций подробно описаны в работах [Мишаткин и др., 2011]. Поскольку, большинство станций на Сахалине и Курильских островах были оснащены цифровым оборудованием в рамках этого проекта, система сбора данных разработки Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН [Система сбора, обработки...2010] была принята, как основная система в СФ ФИЦ ЕГС РАН и дальнейшее развитие сети сейсмических наблюдений в СФ ФИЦ ЕГС РАН проходило в рамках интеграции данных на базе указанной системы.

В итоге, после перехода на цифровые методы регистрации на станциях сети СФ ФИЦ ЕГС РАН, оснащение стационарных наблюдательных пунктов сети состоит к концу 2020 года из 65 сейсмометров (рисунок 3.1). Из них: 27 акселерометров (станции сильных движений), 24 широкополосных и 14 короткопериодных велосиметра. Сеть станций СФ ФИЦ ЕГС РАН включает в себя хорошо зарекомендовавшее себя оборудование известных фирм: Guralp Systems Limited (UK), G. STRECKEISEN, AG (Switzerland), GeoSIG Ltd (Switzerland), Nakusan Corporation (Japan), Corporate Headquarters Kinematics Inc. (USA).

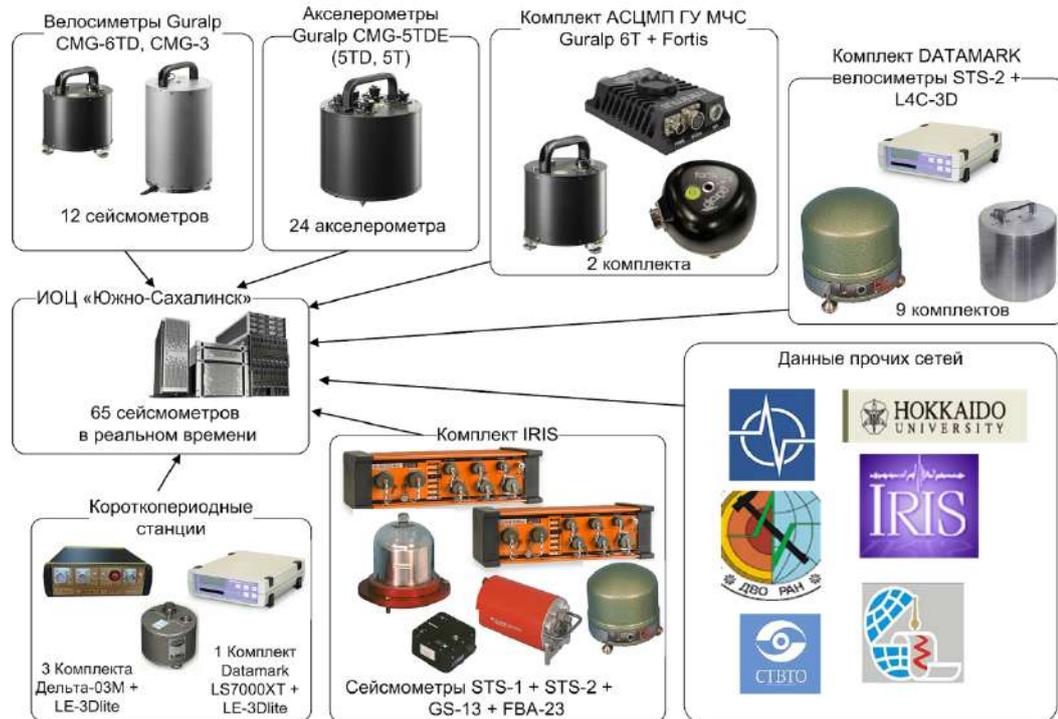


Рисунок 3.1. Источники сейсмологических данных системы сбора и обработки СФ ФИЦ ЕГС РАН

Перечисленное оборудование позволяет получать данные в широком частотном диапазоне. Кроме того, сеть сбора сейсмологических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН включает в себя данные станций ДВО и ФИЦ ЕГС РАН, расположенных на территории Дальневосточного Федерального Округа, а также данные семи станций, расположенных в префектуре Хоккайдо (Япония). Совместное использование данных станций префектуры Хоккайдо позволяет существенно улучшить точность оценки гипоцентров землетрясений в приграничной области. Например, в работе [Evaluation for hypocenter..., 2020] показано, что совместная сеть расширяет расстояние, на котором можно точно определить гипоцентры, более чем на 100 км по сравнению определением параметров землетрясений только с японской или только российской сетью. Этот факт говорит о том, что совместные сейсмические данные могут повысить точность определения гипоцентра в регионе, что обеспечивает повышение производительности при сборе информации о стихийных бедствиях в момент предупреждения о цунами. Дополнительно для задач оперативной обработки и повышения надежности оценок параметров землетрясений организована буферизация потоков данных со станций сети GSN-IRIS, а также сети СТВТО.

3.2. Интеграция компонентов сети сейсмического мониторинга Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН на основе единой системы сбора данных

Решение проблемы интеграции всех перечисленных выше источников сейсмологических данных в единое информационное поле требует использования гибкой системы сбора и обработки данных. Как отмечалось выше, в СФ ФИЦ ЕГС РАН в качестве основной система сбора, контроля, хранения и представления данных и результатов их обработки используется система, разработанная в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН. Интеграция всех систем сбора, использовавшихся в СФ ФИЦ ЕГС РАН автономно, на базе этой системы позволило оперативно решать вопросы по подключению новых станций и серверов сейсмологических служб в различных форматах передачи данных, а также позволило получить доступ к данным независимо от оборудования и исходных форматов источников этих данных [Костылев, 2016; Левин, Костылев, 2014].

Очевидно, что архитектура создаваемой локальной сети, должна соответствовать идеологии указанной системы сбора. Эта система включает в себя: коммуникационную подсистему (каналы связи-передачи данных, протоколы передачи данных, программное обеспечение (ПО)); подсистему обработки сейсмических сигналов, программными средствами контроля системы сбора, а также средствами предоставления и отображения данных и результатов их обработки. Кроме того, использование этой системы сбора на вспомогательных серверах первичного сбора и обработки данных, установленных на стационарных пунктах наблюдений, позволяет привести данные, получаемые от регистраторов станций к единому стандарту, обеспечивает доступ к данным в выбранном интервале времени по запросу в отложенном режиме и решает проблему полноценной обработки данных в подразделениях СФ ФИЦ ЕГС РАН (удаленных сейсмических станциях сети, где ведется первичная обработка данных).

Общая структура сети сбора данных с детализацией задач, решаемых серверами сбора и обработки представлена на рисунке 3.2.

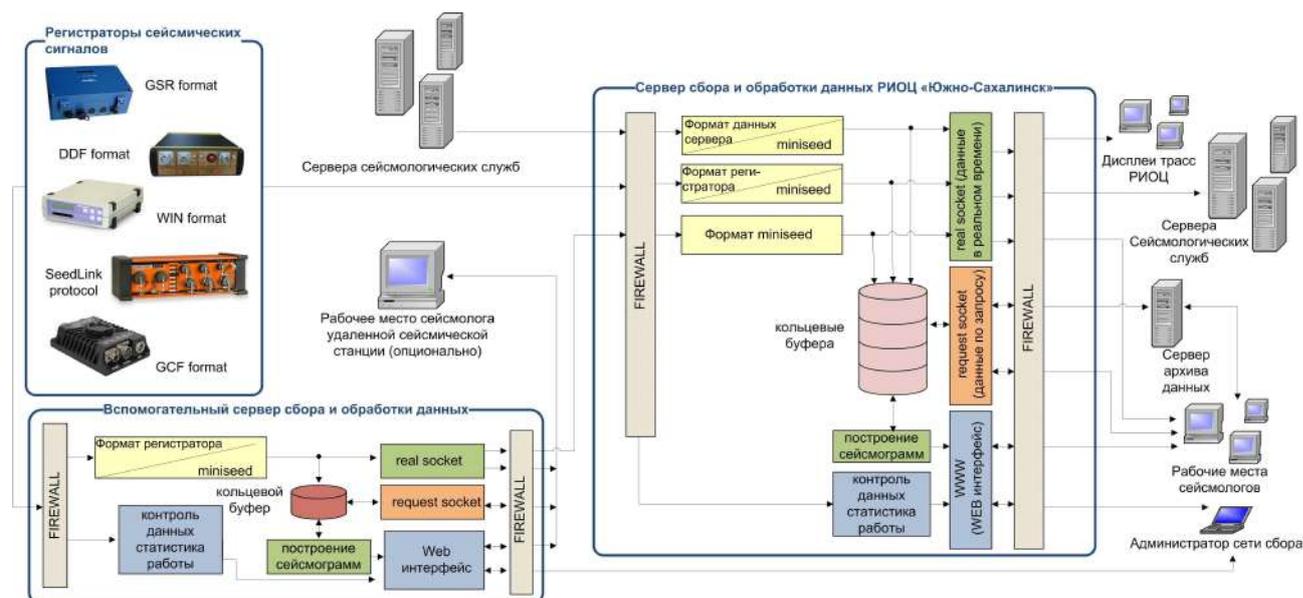


Рисунок 3.2. Структурная схема сети сбора и обработки сейсмологических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН

Серверы сбора данных производят установку соединения с регистраторами данных и удаленными серверами, прием пакетов данных в форматах источника, преобразование данных в формат MiniSEED и создание кольцевых буферов данных по каждой станции на дисковых массивах. Размер кольцевого буфера для каждой станции составляет 10 Гбайт, что позволяет хранить данные за последние 150-200 дней. Доступ к данным с удаленных или локальных автоматизированных рабочих мест сейсмолога (АРМС) производится по технологии клиент-сервер в двух режимах:

- 1) режим непрерывной передачи данных в реальном времени;
- 2) режим доступа к кольцевым буферам данных по запросу.

В первом случае удаленный компьютер (клиент) инициирует соединение с сервером по определенному порту, и сервер начинает непрерывную передачу MiniSEED пакетов клиенту. Во втором случае клиент инициирует соединение с сервером и передает серверу строку запроса, содержащую начало интересующего временного интервала, его продолжительность и маску интересующих каналов. В ответ на запрос сервер производит сканирование кольцевых буферов, поиск блоков данных, удовлетворяющих критерию выборки, и осуществляет их передачу на компьютер клиента. Следует отметить, что сервер сбора может быть сконфигурирован как сервер и клиент одновременно, что позволяет формировать кольцевые буфера непрерывных данных не только от локальных регистраторов, но и аналогичных удаленных систем сбора данных. Эта технология широко используется в глобальной сети сейсмических станций GSN (Global Seismographic Network), известна под названием LISS (Live Internet Seismic Server) и

позволяет организовать различные цепочки передачи данных в сети Интернет. На сервере также производится контроль состояния текущих каналов связи и потоков данных с отображением текущего состояния систем регистрации. Накопление, систематизация и анализ данных инструментальных наблюдений зоны мониторинга производится с использованием банка сейсмологических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН в составе информационной системы, получившей название «Мониторинг сейсмичности Дальневосточного региона» [Shchukin et al., 2018; Щукин, Костылев, 2021].

3.3. Развитие концепции автономного пункта инструментальных наблюдений

Благодаря внедрению цифровых средств регистрации сейсмических данных и широкому использованию на станциях вспомогательных систем сбора и первичной обработки данных, начиная с 2015 года, большинство стационарных пунктов наблюдения сети СФ ФИЦ ЕГС РАН работают без обслуживающего персонала, в автоматическом режиме, с передачей регистрируемых данных в реальном времени на серверы сбора данных. За этот период в СФ ФИЦ ЕГС РАН была сформирована концепция автономного пункта инструментальных наблюдений (АПИИ) [Костылев, 2021a], в соответствии с которой в настоящее время производится установка всех новых станций сейсмического мониторинга, и которой необходимо следовать при создании локальной сети. В стандартном (полном) варианте комплекс АПИИ включает следующее оборудование: сейсмологическое (обычно комплект из велосиметра и акселерометра с соответствующими регистраторами), телекоммуникационное, систему первичного сбора и обработки информации, а также оборудование гарантированного электропитания. Сейсмометры в таком варианте располагаются в специально оборудованной сейсмокамере, а остальное оборудование в защищенном модуле (например, блок-контейнере) или в помещении (например, с использованием электрощитового оборудования). Сейсмокамера представляет из себя заглубленный в грунт герметизированный модуль, с бетонным основанием и защитой от температурных перепадов (рисунок 3.3).

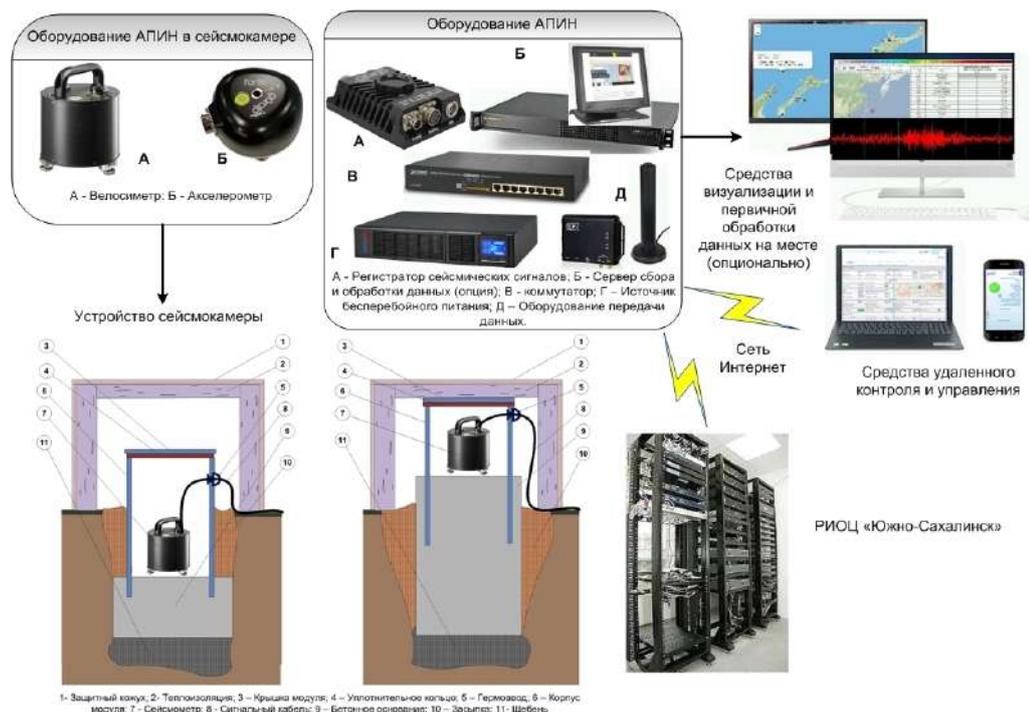


Рисунок 3.3. Структурная схема Автономных Пунктов Инструментальных Наблюдений (АПИИ) СФ ФИЦ ЕГС РАН

Примерами реализации АПИИ в полной конфигурации могут служить пункты инструментальных сейсмологических наблюдений на островах Кунашир и Итуруп, установленные в 2020 году, в целях обеспечения поддержки принятия решений Аварийно-спасательного центра мониторинга и прогноза чрезвычайных ситуаций (АСЦМП) Главного управления МЧС России по Сахалинской области [Костылев, 2021а; Костылев, 2021б]. Для обеспечения доступа к данным и контроля работы комплекса произведена установка и настройка необходимого программного обеспечения, организована трансляция потоков сейсмологических данных на рабочее место отдела мониторинга АСЦМП и на сервер сбора РИОЦ «Южно-Сахалинск», настроена система защиты от несанкционированного доступа (Firewall), а также необходимые настройки для удаленного доступа и управления оборудованием станции. В рамках взаимодействия со структурными подразделениями ГУ МЧС России по Сахалинской области по обеспечению оперативной информацией о возможной угрозе в отделениях мониторинга АСЦМП МЧС РФ установлено оборудование для визуализации сейсмических событий и работы сейсмического оборудования.

3.4. Эксплуатация станций локальных и временных сейсмических сетей

Также, для создания сети локального мониторинга в районе Солнцевского угольного разреза, безусловно, будет полезен опыт СФ ФИЦ ЕГС РАН и автора в эксплуатации региональной сети (например, в рамках Службы предупреждения о Цунами [Костылев и др., 2017б] в частности, локальной сети мониторинга юга Сахалина [Семенова и др., 2018а]. Наблюдения за сейсмичностью южной части о. Сахалин проводятся с 2001 г. с использованием локальной сети из девяти полевых сейсмических станций. Высокочувствительные станции позволяют вести полноценную регистрацию слабых землетрясений на юге острова. Каталоги с высокой представительностью и архивы волновых форм станций являются источником для многочисленных научных исследований по сейсмичности юга Сахалина [Семенова и др., 2018б] и его разломных структур [Богинская и др., 2019]. Отдельно необходимо учесть опыт оперативного развертывания сетей инструментальных наблюдений в эпицентральных зонах сахалинских землетрясений [Семенова и др., 2017]. Установка подобных сетей проводилась автором на севере о. Сахалин в 2014 г. во время возникновения серии ощутимых землетрясений в Ногликском районе. Наблюдения проводились в течение 20 дней, после чего три станции были демонтированы, а один из пунктов переведен на передачу данных в режиме, близком к реальному времени, на серверы сбора в РИОЦ «Южно-Сахалинск». В 2016 году, после землетрясения 14 августа 2016 г. с $M_w=5.8$ [Сафонов, Семенова, 2022] в районе села Онор, оперативно был развернут пункт наблюдений с использованием широкополосный акселерометра со встроенным регистратором Guralp CMG-5TDE, и обеспечивающий передачу данных через Интернет, что позволило усилить разреженную сеть станций центральной части о-ва Сахалин и вести полноценную регистрацию афтершоков с $M=3.0$.

Интересен опыт автора в реализации проектов Института Морской Геологии и Геофизики ДВО РАН, связанных с установкой и эксплуатацией пунктов сейсмических наблюдений, включающих как временные сети мониторинга, так и стационарные станции в составе комплексных геофизических исследовательских полигонов. В июне 2017 г. в рамках комплексных научных исследований по проекту «Комплексные вулканологические и геоэкологические исследования на о. Матуа (Центральные Курильские острова)» была развернута временная сеть из четырех сейсмических станций, каждая из которых укомплектована короткопериодным сейсмоприемником. Результаты, полученные сетью за 19 дней наблюдений, позволили получить новые представления о пространственно-временном распределении сейсмичности в районе Центральных Курил и установить параметры ошибок в определении гипоцентров землетрясений [Закупин и др., 2017]. Развертываниям сейсмических

станций в составе комплексных геофизических полигонов посвящены работы, связанные с исследованиями сейсмичности в южной части острова Сахалин, где были апробированы методы по монтажу оборудования [Kostylev et al., 2019; Костылев, 2019а; Каменев и др., 2019] и получены интересные результаты, связанные с комплексированием различных геофизических данных, полученные, в том числе, и районах добычи полезных ископаемых [Костылев и др., 2020; Костылев, Каменев, 2019б].

Использование всего вышеизложенного опыта позволяет подготовить и организовать систему локального сейсмического мониторинга в районе Солнцевского угольного разреза с интеграцией получаемых данных в единое информационное поле сейсмологических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Выводы по главе 3

Третья глава рассматривает процесс создания единого информационного поля сейсмических данных на основе сейсмических сетей различных платформ и систем сбора данных.

В главе обобщён опыт автора в формировании и развитии сейсмической сети и системы сбора сейсмологических данных в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН. Приведены описания принципов и технологий, реализованных в СФ ФИЦ ЕГС РАН в организации процессов создания пунктов сейсмических наблюдений и интеграции их в единую систему сбора сейсмологических данных. Детально представлена концепция реализации автономных пунктов инструментальных наблюдений (АПИИ), как основы для создания сейсмических станций сетей любого уровня: регионального, локального, а также полевых и временных сетей.

В результате работ, выполненных автором за период 2015-2020 годы, система сейсмического мониторинга СФ ФИЦ ЕГС РАН была сформирована на базе единой системы сбора и обработки сейсмологической информации, что позволило значительно расширить количество наблюдательных пунктов и станций, входящих в систему сбора и значительно повысить регистрационные возможности сети наблюдений.

В настоящее время существующая сеть сейсмического мониторинга позволяет производить обнаружение и регистрацию как слабых, так и сильных сейсмических событий, выполнять оперативную обработку инструментальных данных о сейсмических событиях, с целью быстрой оценки возможной угрозы и её масштабов.

Созданный банк сейсмологических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН выполняет сбор, накопление, систематизацию и анализ данных инструментальных наблюдений зоны мониторинга. На основе этих материалов проводится анализ и оценка сейсмической обстановки в Дальневосточном регионе РФ, представляемые на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (СФ РЭС).

Проведенные работы позволили рассматривать систему сбора сейсмологических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН в качестве одной из важнейших компонент сейсмической подсистемы Уникальной Научной Установки (УНУ) ФИЦ ЕГС РАН — Комплекса непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира [Дягилев, Сдельникова, 2022].

ГЛАВА 4. СОЗДАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ МОНИТОРИНГА РАЙОНА СОЛНЦЕВСКОГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЁ РАБОТЫ³

4.1. Состояние сети мониторинга СФ ФИЦ ЕГС РАН на о. Сахалин

К моменту принятия решения о создании в районе Солнцевского угольного разреза локальной сети сейсмического мониторинга (в конце 2020 года), сеть Сахалинского филиала на о. Сахалин включала в себя 16 стационарных станций, оснащенных регистрирующей аппаратурой различного типа и 10 автономных полевых станций на юге острова [Фокина и др., 2023]. Карта расположения стационарных станций в центральной и южных частях острова Сахалин представлена на рисунке 4.1.

³При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Kostylev D.V.**, Boginskaya N.V. The first results of the seismic monitoring system of the Solntsevsky open pit coal mine area (on Sakhalin Island) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – P. 012002. – DOI 10.1088/1755-1315/946/1/012002. (0,75 п.л., вклад автора 75%, импакт-фактор SJR – 0,199)

2. **Костылев Д.В.**, Богинская Н.В. Сейсмический мониторинг района угледобычи на о. Сахалин с использованием временных сетей ФИЦ ЕГС РАН // Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13, № S2. – С. 1-6. – DOI 10.5800/GT-2022-13-2s-0634. (0,75 п.л., вклад автора 60%, импакт-фактор SJR – 0,293)

3. Kostyleva N., **Kostylev D.** Catalog of industrial explosions in the coal mining area on Sakhalin Island (Russia) for 2019-2022 // ISC Seismological Dataset Repository. - 2023. – DOI 10.31905/PCCATGI2

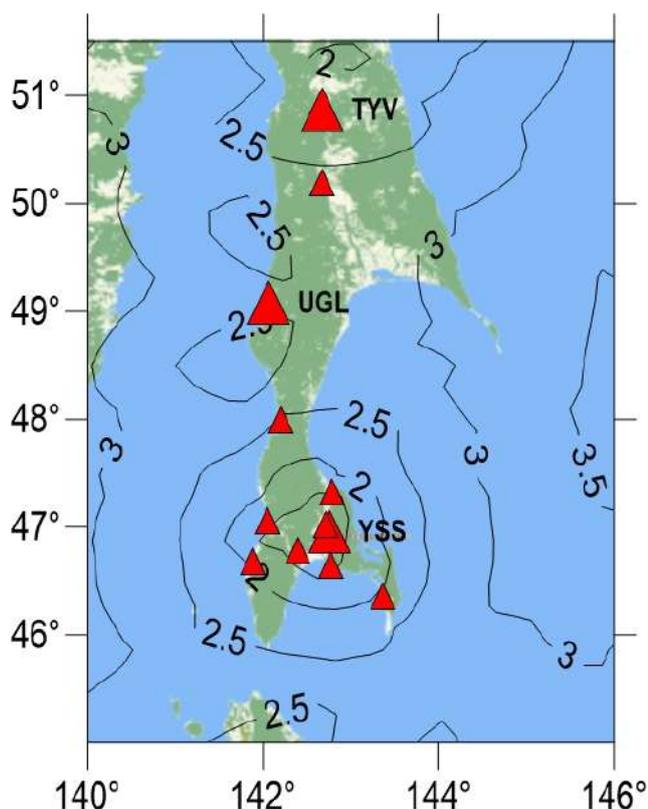


Рисунок 4.1. Расположение стационарных сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН в центральной и южных частях острова Сахалин и регистрационные возможности сети [Костылев, 2021а; Сафонов и др., 2020]

Текущая конфигурация сети сейсмических станций, с учетом установленного оборудования и привлечения в оперативном режиме данных станций соседних регионов, позволяет обеспечить в исследуемом районе (к югу от сейсмической станции «Углегорск» (UGL)) возможность регистрации, как минимум, тремя сейсмостанциями (что необходимо для корректного определения эпицентра) землетрясений начиная с представительной магнитуды $M_{min}=2.5$, что, очевидно, недостаточно для проведения детального сейсмического мониторинга в районе Солнцевского угольного разреза, однако, создаёт необходимую региональную базу, которая должна быть дополнена создаваемой локальной сетью в районе Солнцевского угольного разреза.

4.2. Сеть сейсмического мониторинга СУР. Этапы развития. Аппаратное и программное обеспечение

Ещё в процессе проведения макросейсмических наблюдений в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения 2020 года [Семенова и др., 2020] была проведена предварительная

оценка мест установки пунктов сейсмических наблюдений в районе СУР пригодных для развертывания локальной сети. В феврале 2021 года на местах планируемых для установки оборудования были проведены рекогносцировочные работы, включающие в себя оценку пригодности места с учетом следующих известных критериев [Baisch et al., 2012]: наличие технической инфраструктуры (электроснабжение и присутствие устойчивого уровня сигнала операторов сотовой связи для передачи данных); доступность и безопасность места установки оборудования и наличие согласия собственников объектов для подходящих помещений. Выполнение перечисленных критериев на практике требует особого внимания и, обычно, трудно достижимо. Поэтому, на этапе подготовки к проведению работ было проведено согласование с Управлением образования Углегорского городского округа с целью возможного использования территорий и помещений школ Углегорского района для размещения оборудования. Дополнительно были выполнены работы по измерению уровня сейсмического шума на местах установки [Kostylev, Boginskaya, 2021].

Работы по измерению уровня сейсмического шума проводились с использованием комплекта оборудования Nanometrics — широкополосного универсального сейсмометра TrilliumCompact [<https://nanometrics.ca/products/seismometers/trillium-compact>] и регистратора Centaur [<https://nanometrics.ca/products/digitizers/centaur>], как максимально адаптированного для использования во временных сетях быстрого развертывания. По результатам подготовительных работ проведена предварительная оценка регистрационных возможностей планируемой локальной сейсмологической сети в районе Солнцевского угольного разреза и прилегающей территории с учетом локальных особенностей затухания волн и уровня сейсмических шумов на станциях [Дягилев, 2020]. Для расчетов использовалось уравнение макросейсмического поля для Сахалина [Оскорбин, Бобков, 1997], а также шумовая обстановка на каждой станции сети, измеренная опытным путем. Результаты оценки, а также планируемое расположение сейсмических станций, приведены на рисунке 4.2.

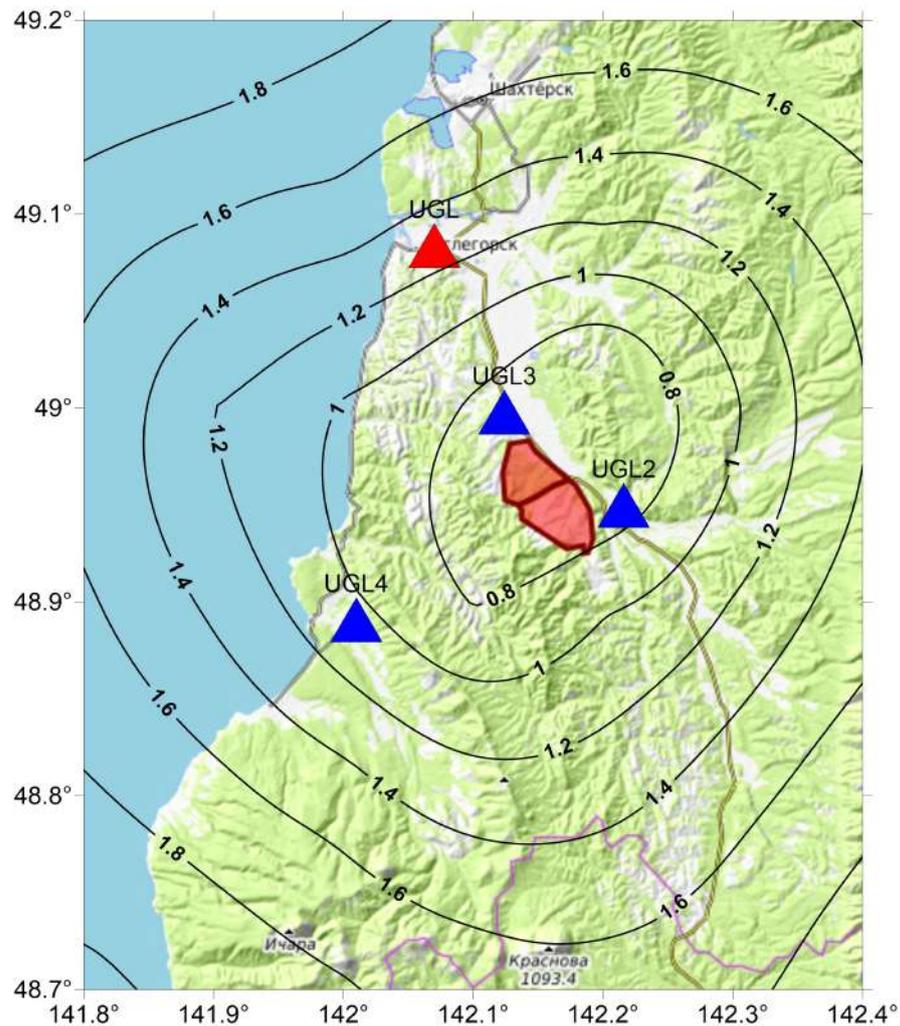


Рисунок 4.2. Планируемые места расположения сейсмических станций (синие треугольники) вокруг СУР (красный полигон). Изолиниями показаны расчетные регистрационные возможности планируемой сети

Выбор и подготовка оборудования производились с учетом проведенных рекогносцировочных работ, а также исходя из общих рекомендаций по развертыванию локальных сетей мониторинга наведенной сейсмичности [Templeton et al., 2021] и опыта использования оборудования на пунктах сейсмических наблюдений, описанного выше. Немаловажным фактором выбора оборудования являлось его наличие в текущий момент, поскольку требовалась оперативность выполнения работ. Сахалинский филиал ФИЦ ЕГС РАН располагал вышеуказанными комплектами Nanometrics, производителя имеющего большой опыт в разработке локальных систем мониторинга объектов горнодобывающей промышленности [<https://nanometrics.ca/industries/mining>]. Данное оборудование хорошо зарекомендовало себя на станциях ФИЦ ЕГС РАН. В частности, в последние годы такие

комплекты используются, в том числе, в условиях Арктики [Виноградов и др., 2019; Антоновская и др., 2022] или, например, в составе локальной сети мониторинга Байкальской рифтовой зоны [Тубанов и др., 2021]. Кроме того, описанная методика [Разинков и др, 2017] прямой установки сейсмометров Nanometrics в грунт, способствующая максимально сэкономить финансовые и временные затраты по монтажу станций, позволяет определить указанные комплекты в качестве основных регистрирующего оборудования для создаваемых станций.

В качестве вспомогательного оборудования на станциях мониторинга было решено рассмотреть установку комплектов с короткопериодными сейсмометрами СПВ-3к [<http://logsys.ru/sejsmopriemnik-velosimetr-trehkomponentnyj-spv-3k/>] и регистраторами компании GeosigGMS-18 (Швейцария) [<https://www.geosig.com/GMS-24---id12576.aspx>], предложенными для системы мониторинга еще одной заинтересованной стороной — ИМГиГ ДВО РАН. Учитывая имеющийся опыт эксплуатации указанных сейсмометров, в том числе, и в полевых условиях на Курильских островах [Закупин и др., 2017], целесообразность использования данных приборов не вызвала вопросов, тем более, что сочетание короткопериодных и широкополосных велосиметров позволяет расширить регистрируемый диапазон частот [Чебров и др., 2103]. Сейсмометрические системы контроля сейсмичности и инженерных объектов на базе оборудования компании Geosig хорошо известны [Разинков, Сидоров-Бирюков, 2022], в том числе и по многолетнему опыту использования на о. Сахалин. В частности, в СФ ФИЦ ЕГС РАН использует регистраторы Geosig в составе станций сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами [Мишаткин и др., 2011], а один из крупнейших операторов нефтяных и газовых проектов на Сахалине — ООО «Сахалинская Энергия» более 10 лет эксплуатировал регистраторы именно модели GeosigGMS-18 в составе собственной системы сейсмического мониторинга, объекты которой расположены вдоль всей трассы транссахалинской трубопроводной системы (13 станций от залива Чайво на севере острова до порта Пригородное на юге [Case Studies // Sakhalin Oil and Gas, Russia. URL: <https://www.geosig.com/EEW---Sakhalin-Oil-and-Gas--Russia-pg90.aspx>]). Местом для оснащения данными комплектами оборудования на первом этапе был выбран один из вновь создаваемых пунктов мониторинга, а также сейсмическая станция «Углегорск», где с 2010 года используется цифровое оборудование компании Guralp (Великобритания) — широкополосный велосиметр CMG-6TD и акселерометр CMG-5TD [Костылев, Богинская, 2022]. Основные характеристики сейсмометров, создаваемой сети мониторинга представлены в Таблице 4.1.

Основные характеристики сейсмометров сети мониторинга

Наименование характеристики	Guralp CMG-6TD	Nanometrics Trillium Compact 120s	Геотех СПВ-3к
Количество измерительных каналов	3	3	3
Чувствительность	2400 В*с/м	750 В*с/м	500 В*с/м
Максимальная преобразуемая скорость	0,01 м/с	0,026 м/с	0,005 м/с
Рабочий частотный диапазон преобразования (по уровню минус 3 дБ)	0,03 — 100	0,008 — 100	0,5 — 65
Динамический диапазон преобразования, не менее	120 дБ	152 дБ	110 дБ
Диапазон рабочих температур,	-20 ... +70 °С	-20 ... +60 °С	-30 ... +55 °С
Габаритные размеры (диаметр × высота)	154 × 246 мм	90 x 113 мм	160 x 135 мм
Масса, не более	2,7 кг	1,2 кг	2,9 кг
Питание (напряжение источника постоянного тока)	12 — 28 В	9 — 36 В	8 — 18 В
Потребляемая мощность при напряжении питания 12 В	0,93 Вт	0,18 Вт	0,65 Вт

Поскольку комплекты оборудования Nanometrics не требовали дополнительных программных и аппаратных доработок, работы по установке станций сети мониторинга были проведены в короткие сроки и в апреле 2021 года введены в эксплуатацию первые две станции сети мониторинга — UGL2 и UGL3. Планируемый к установке в средней школе села Никольское пункт наблюдения (UGL3 на рисунке 4.2) был перенесен к западу от СУР в район Мыса Хакуй и размещен в частном секторе по причине угрозы закрытия и ликвидации школы в с. Никольское [Закупин, 2021б]. Оборудование размещалось с соблюдением концепции оснащения АПИН, изложенной выше в данной главе. Сейсмометры были установлены на грунт, с использованием заглубленного постаменты, а регистратор сейсмических сигналов и сопутствующее оборудование (источник бесперебойного питания и средства передачи данных) сосредоточены в телекоммуникационном ящике в предоставленных помещениях. Фото установки показано на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3. Оборудование станций UGL2 и UGL3. Слева — регистратор сейсмических сигналов и оборудование бесперебойного питания и передачи данных в телекоммуникационном ящике, справа — сейсмометр в заглубленной сейсмокамере

Регистрация сейсмического шума проводится станциями в двух режимах — с записью на встроенную в регистратор карту памяти объемом 16 Гб и с передачей данных в режиме реального времени по сети Интернет на сервер сбора данных в РИОЦ «Южно-Сахалинск» с использованием протокола Seedlink, поддерживаемого регистратором NanometricsCentaur. Для получения данных на сервере сбора подготовлен соответствующий модуль, отвечающий за запрос и получение данных с регистратора, выделен кольцевой буфер размером 10 Гб на каждую станцию. Доступ к сети интернет пунктов UGL2 и UGL3 обеспечивается с использованием каналов оператора сети сотовой связи «Мегафон», имеющего хорошее покрытие в местах установки оборудования. Для доступа к регистратору со стороны сервера сбора РИОЦ «Южно-Сахалинск» и для контроля работы регистратора применена технология обращения к роутеру пункта наблюдений (4G роутер MegaFon R100-1) по статическому IP адресу с последующей переадресацией запросов на внутренний IP адрес регистратора. Электропитание осуществляется подключением к сети 220В с применением системы бесперебойного питания на базе комплектов в составе: ИБП INELT Intelligent 1000LT2 + Аккумуляторная батарея (2 штуки) Delta DTM1265L (12V, 65AH). Для удаленного контроля

текущих параметров регистратора, а также запросов данных, в случае необходимости дозагрузки данных, которые могут отсутствовать на сервере сбора из-за возможных обрывов в каналах передачи данных, используется доступ с использованием web интерфейса регистратора NanometricsCentaur. Web интерфейс позволяет контролировать все основные параметры оборудования (качество GNSS сигнала, параметры электропитания, позицию масс сейсмометра, температурный режим, состояние карты памяти и прочие), а также выполнять запросы к данным на карте памяти за указанный временной интервал (рисунок 4.4).

The screenshot displays the Nanometrics Centaur web interface. At the top, there is a navigation menu with tabs: Обзор, Состояние, Датчики, События, График сигнала, Сопровождение, and buttons for Помощь, Вход, and settings. The main content area is divided into several sections:

- Время (Time):** Status: Time OK, Accuracy: 27,30 μ s. GNSS location: 49.025823N 142.014844E.
- Устройство (Device):** Operating conditions: Power consumption: 1,3 W, Input voltage: 16,3 V, Temperature: 29,8 $^{\circ}$ C.
- Хранение (Storage):** Memory status: Media OK, Archive status: Archive OK, Contains events: Нет, Memory used: 78% / 29,715 GB.
- График сигнала (Signal Graph):** A line graph showing signal amplitude in μ m/s over time. The y-axis ranges from 47,55 to 50,10. The x-axis shows a time range from 2023-10-04 03:52:12 to 2023-10-04 04:52:12. The graph shows a fluctuating signal around a mean of 48,76 μ m/s.
- Запрос данных в интервале времени (Data Request):** A form to request data from internal memory. It includes options for file format (MiniSEED, CSV), data type (Time series, Instrument status), and search criteria (Primary, Channel 1). The time interval is set from 2023-10-04 03:52:12 to 2023-10-04 04:52:12 with a duration of 1 hour.

Below the screenshot, there is a red text label: **Directory: /archive/**. To the right, there is a blue text label: **FTP сервер регистратора с архивом данных**.

Parent Directory	Size	Modified
.PartialContinuousArchives	207 bytes	Oct 4, 2023 4:00:04 AM
2021/	65536 bytes	Dec 1, 2021 12:00:02 AM
2022/	65536 bytes	Nov 1, 2022 12:00:02 AM
2023/	65536 bytes	Oct 1, 2023 12:00:02 AM

Рисунок 4.4. Возможности Web интерфейса регистратора Nanometrics Centaur

Формирование комплектов оборудования на базе регистратора GeosigGMS-18 заняла более продолжительное время, поскольку требовалась их доукомплектование GPS приёмниками (GarminGPS16x-HVS), а также подготовки коммутационных кабелей для подключения сейсмометров СПВ-3к и подключения регистраторов к сети Ethernet. Кроме того, используемый в регистраторах протокол передачи сейсмических данных «ModifiedprotocolforGMSSeries» оказался отличным от стандартного протокола регистраторов GeoSIG (GSBU – GeoSIG / Bergen University – protocol [Razinkov, 2008], поддерживаемого программным обеспечением системы сбора РИОЦ «Южно-Сахалинск», что потребовало

доработок программных модулей системы сбора данных, которая и была произведена в результате консультаций с производителем оборудования и разработчиками ПО системы сбора (КФ ФИЦ ЕГС РАН). После проведения перечисленных работ и тестирования комплекта в режиме передачи данных в Южно-Сахалинске, первый комплект оборудования «Регистратор GeoSIGGMS-18 + сейсмометр СПВ-3к» был установлен на сейсмической станции «Углегорск» в дополнение к имеющемуся там сейсмологическому оборудованию, интегрирован в сеть сейсмической станции и включен в систему сбора данных СФ ФИЦ ЕГС РАН 9 июня 2022 года в режиме передачи данных в реальном времени.

Установка второго такого комплекта (станция UGL4) была произведена 01 сентября 2022 года в селе Поречье (частный сектор). Установка также проводилась в соответствии с концепцией АПИН и принципиально не отличалась от монтажа пунктов UGL2 и UGL3 (рисунок 4.5)



Рисунок 4.5. Сейсмометры СПВ-3к, установленные на сейсмической станции «Углегорск» (слева) и АПИН UGL4 (справа) и регистратор GeoSIGGMS-18

К сожалению, территория села Поречье не является зоной покрытия оператора «Мегафон», в связи с чем, не удалось получить требуемый для передачи данных в режиме реального времени для системы сбора данных стационарный IP адрес. Для доступа к данным, в этом случае, было применено решение, обеспечивающее доступ к данным, накапливающимся на карте памяти регистратора, в отложенном режиме (по запросу), используя канал связи оператора МТС и промышленный модем-роутер Robustel R3000-Q3PA с внешней антенной, установленный на пункт наблюдений UGL4. Доступ осуществляется с использованием возможностей реализованных в программном комплексе GeoDAS [<https://www.geosig.com/GeoDAS-id12565.aspx>] – программе, используемой для настройки

инструмента и для сбора данных, любого стандартного регистратора GeoSIG. Для решения задачи получения данных по запросу, оператор в указанной программе, после коммутации по сети Интернет с регистратором, формирует запрос в принятом в программе формате, который загружается в регистратор. В ответ, регистратор подготавливает файл в формате MiniSEED в заданном временным интервалом и «сообщает» оператору о его готовности, после чего, оператор отправляет запрос на загрузку данного файла (рисунок 4.6).

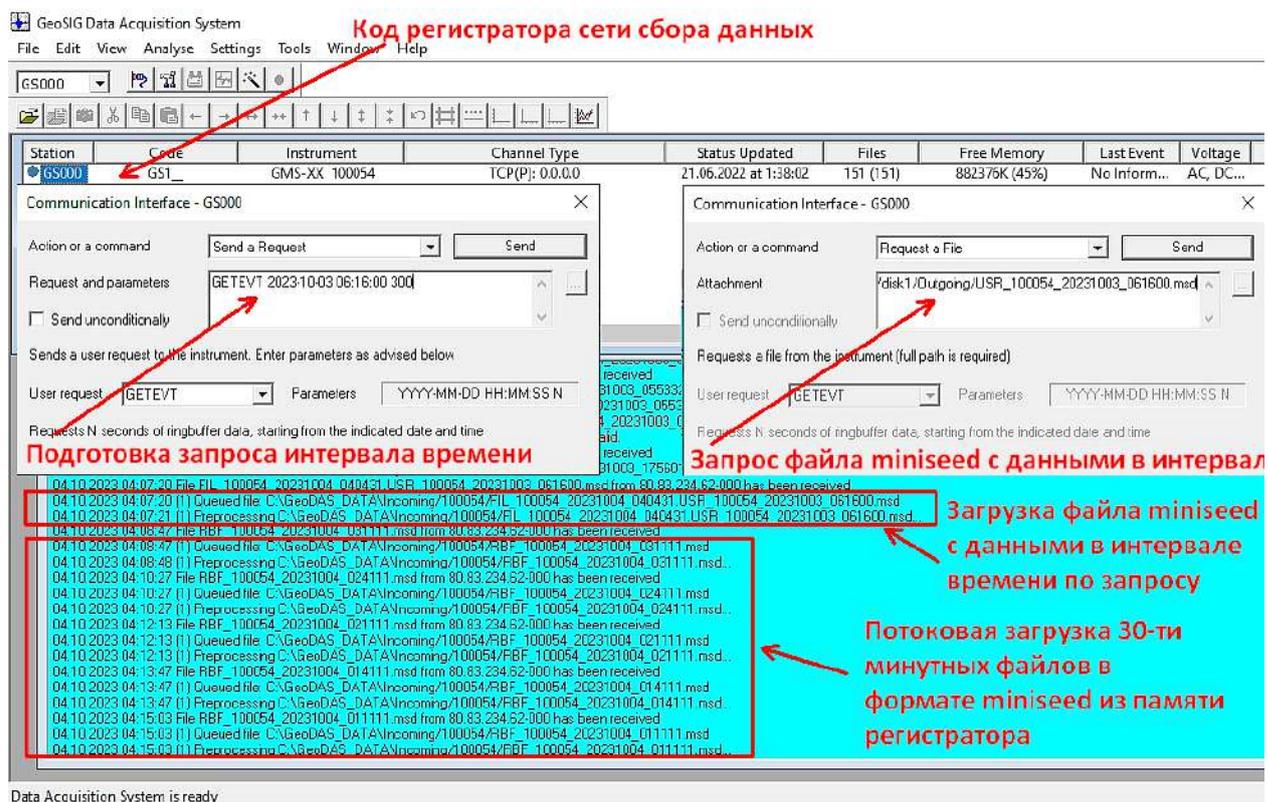


Рисунок 4.6. Интерфейс программы GeoDAS и пример использования функций программы для загрузки данных

Таким образом, для известных сейсмических событий, появляется возможность использовать данные четвертой станции локальной сети — UGL4, что существенно расширяет регистрационные возможности и точность лоцирования эпицентров. Кроме того, регистратор GeoSIG предусматривает возможность непрерывной потоковой загрузки файлов с данными в формате MiniSEED из внутренней памяти регистратора при подключении его к компьютеру, настроенному как сервер в программе GeoDAS (рисунок 4.6).

Таким образом, полученная сеть из 4-х станций, достаточно равномерно расположенных относительно СУР, практически соответствует основным требованиям, предъявляемым к сетям подобного типа. В связи с тем, что относительно планируемой топологии сети (рисунок 4.2)

при практической реализации были внесены изменения, была проведена повторная оценка регистрационных возможностей теперь уже созданной локальной сейсмологической сети в районе Солнцевского угольного разреза и прилегающей территории по описанным ранее алгоритмам. Результаты оценки представлены на рисунке 4.7.

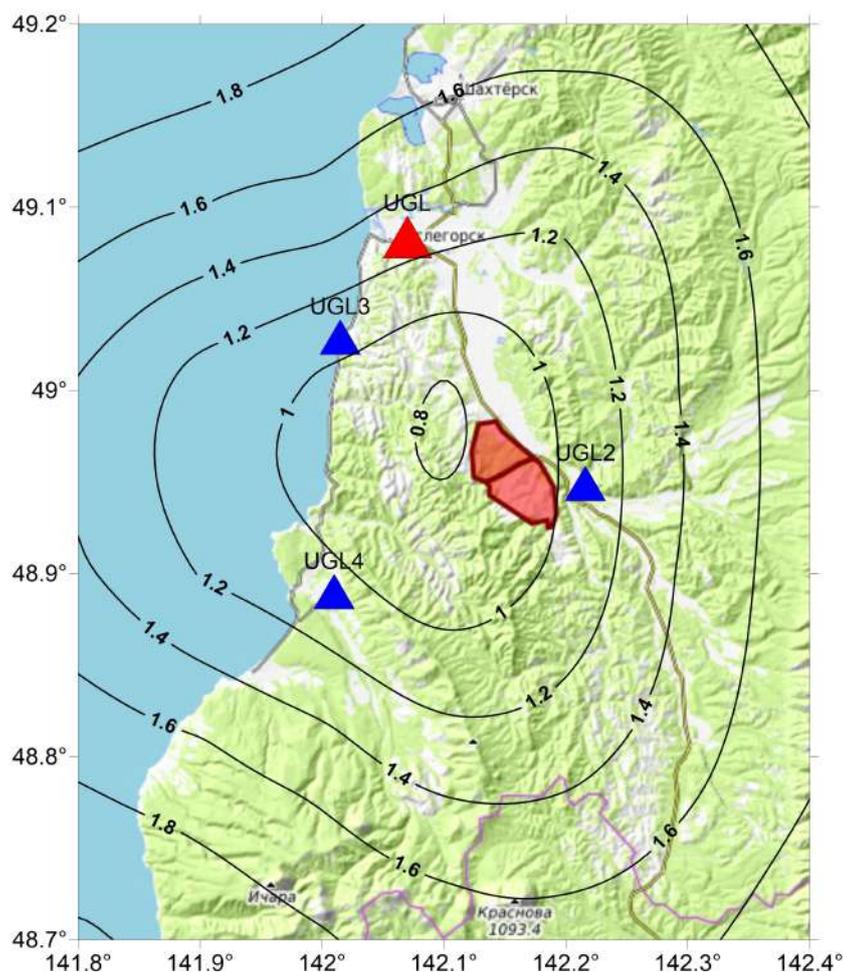


Рисунок 4.7. Расчетные регистрационные возможности созданной сети

Как видно из рисунка, созданная сеть должна устойчиво регистрировать сейсмические события с магнитудой $M_L=1.0$ как на территории СУР, так и в непосредственной близости от него.

Для станций UGL2 и UGL3 летом 2021 года был проведен анализ уровня спектральной плотности мощности сейсмического шума [McNamara, Boaz, 2005] в дневное и ночное время, чтобы оценить возможные влияния внешних источников помех на получаемые результаты. Для анализа были использованы записи сейсмического шума для промежутков времени без зарегистрированных сейсмических событий и атмосферных явлений (порывы ветра, циклоны).

Результаты, полученные с использованием IRIS DMC Noise Toolkit [Noise Toolkit ...дата обращения...2023] представлены на рисунке 4.8.

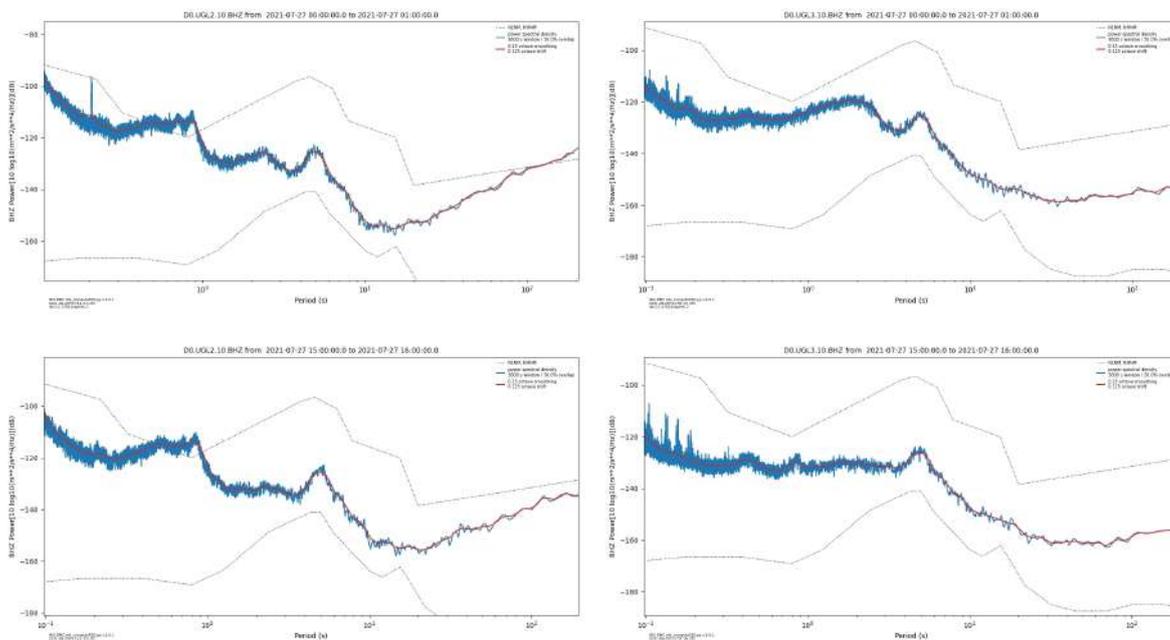


Рисунок 4.8. Спектральная плотность мощности сейсмического шума станции UGL2 (слева) и UGL3 (справа) в дневное (верхние графики) и ночное (внизу) время

Оценка уровня шумов проведена относительно моделей Петерсона (моделей низкого NLNM и высокого NHNM уровней шума), являющихся эталонами для оценки уровня сейсмического шума в окрестностях функционирования сейсмической станции [Peterson, 1993]. Как видно из рисунка 4.8 для станции UGL2 в диапазоне частот 1 -2 Гц наблюдается незначительное превышение уровня NHNM, что, в принципе, было ожидаемо при установке в здании, но не должно вызывать значительных затруднений при обработке записей, особенно при использовании фильтрации сигнала. В целом, полученные данные показывают, что уровень шумов находится практически в пределах допустимых значений и что размещение сейсмических станций на выбранных площадках приемлемо. Полный перечень оборудования приведен в таблице 4.2 и на рисунке 4.9, показывающем организацию направления потоков обмена данными по сети Интернет.

Полный перечень используемого оборудования и данные о станциях локальной сети мониторинга СУР

Наименование станции	«Углегорск»			«Краснополье»	«Мыс Хакуй»	«Поречье»
Код станции	UGL1			UGL2	UGL3	UGL4
Тип сейсмометра	Guralp CMG-6TD	Guralp CMG-5TD	СПБ-3к	Nanometrics Trillium Compact 120s	Nanometrics Trillium Compact 120s	СПБ-3к
Тип регистратора	Guralp CMGCD	Guralp CMGDM	Geosig GMS-18	Nanometrics Centaur CTR4-3S	Nanometrics Centaur CTR4-3S	Geosig GMS-18
GPS приёмник	Guralp CMG-GPS4	Guralp CMG-GPS4	Garmin GPS16x-HVS	Nanometrics 18863R2	Nanometrics 18863R2	Garmin GPS16x-HVS
Оборудование передачи данных	VSAT Hughes HN7700S					4G модем-роутер RobustelR3000-Q3PA
Оборудование бесперебойного питания	ИБП INELT Intelligent 1000LT2 + аккумулятор DELTA DTM1265L(2шт.)					Встроенный аккумулятор регистратора 12V 7Ah
Координаты станции φ, °N; λ, °E; h, м	49.077° 142.066° 31			48.946° 142.217° 83	49.026° 142.014° 10	48.887° 142.010° 54
Дата ввода в эксплуатацию	12.09.2010	12.09.2010	09.06.2022	22.04.2021	22.04.2021	30.08.2022

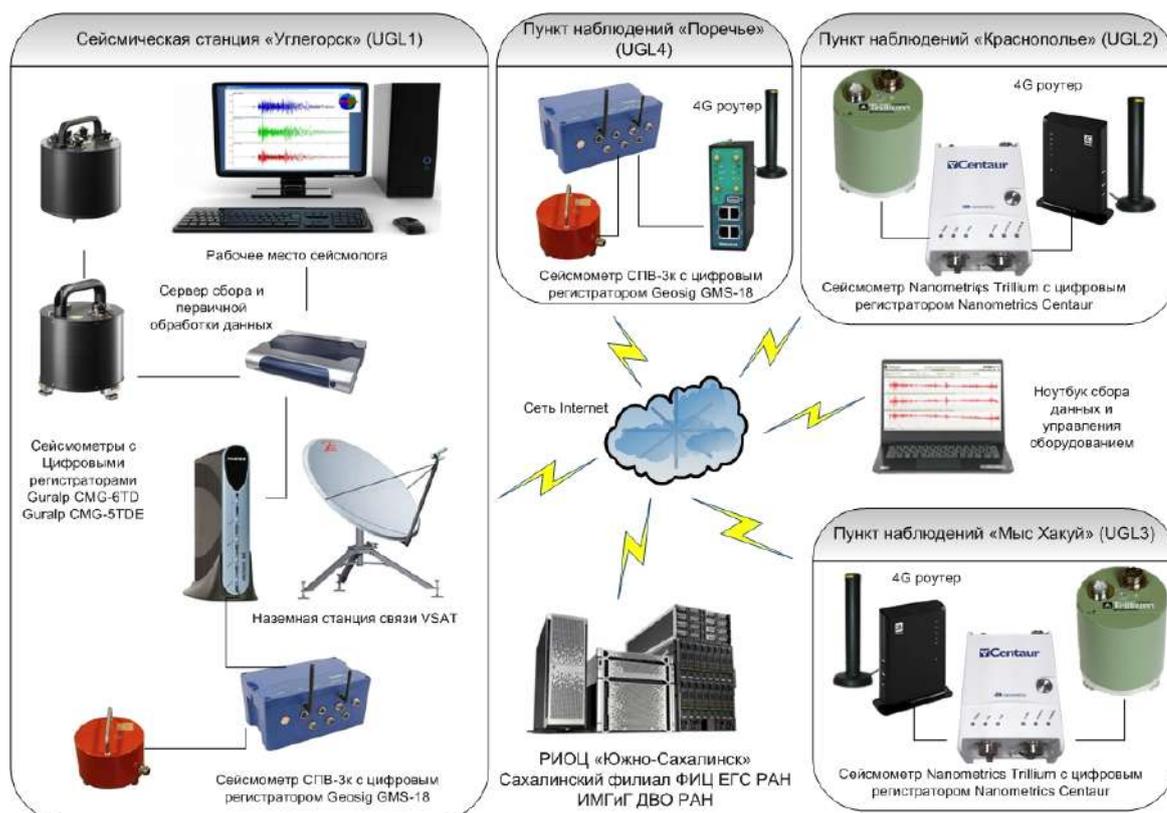


Рисунок 4.9. Общая схема оборудования системы мониторинга СУР и потоков данных

В данной схеме регистраторы UGL1 – UGL3, предоставляют данные в режиме реального времени, обработка которых производится в оперативном режиме (при возникновении сейсмических событий) силами дежурной смены РЦОЦ «Южно-Сахалинск», а данные этих станций, дополненные материалами станции UGL4, формируют архив записей волновых форм на серверах СФ ФИЦ ЕГС РАН, который используется для детализации и уточнения получаемых результатов в Отделе сводной обработки сейсмических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН и лаборатории сейсмологии ИМГиГ ДВО РАН. Обработка данных производится в программном комплексе DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010]. Для корректного использования данных, получаемых новыми станциями, в программе DIMAS (включая определение энергетических характеристик сейсмических событий, анализ спектрального состава и т.д) необходимо дополнение программы информацией с характеристиками используемого оборудования. Данная информация была подготовлена в виде Response файлов (АЧХ) для комплектов оборудования: сейсмометр Nanometrics Trillium + регистратор Nanometrics Centaur и сейсмометр СПВ-3к + регистратор GeosigGMS-18 в форматах Response файлов, совместимых с программой DIMAS. Для создания файлов были использованы данные с характеристиками оборудования (чувствительности сейсмометра, коэффициенты преобразователя регистраторов), а также данные о частотной характеристики сейсмометров в представлении полюсов и нулей,

полученные от производителей оборудования. На основании подготовленных файлов в программе DIMAS построены графические представления АЧХ всех трёх типов используемых на станциях локальной сети комплектов оборудования (включая информацию о велосиметре сейсмической станции «Углегорск» (рисунок 4.10).

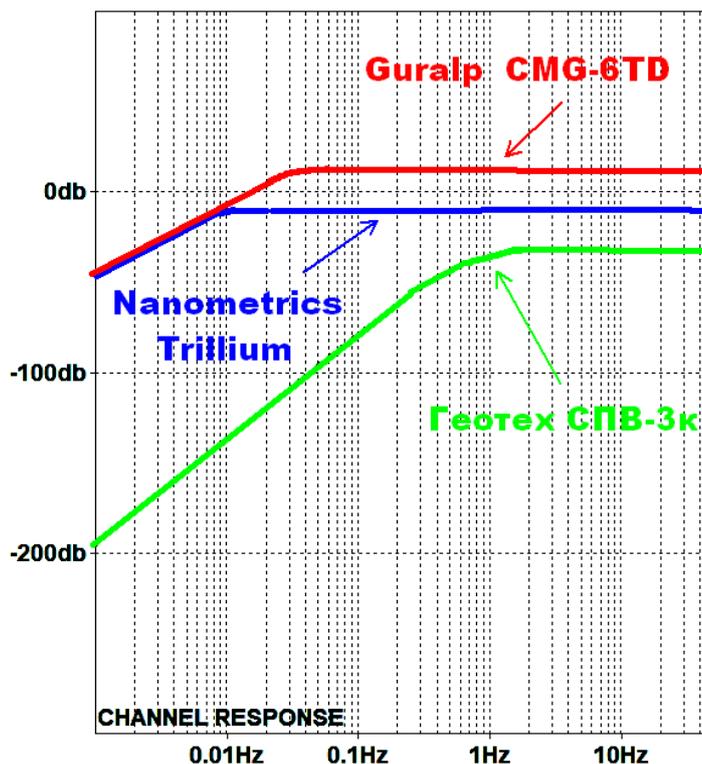


Рисунок 4.10 . Частотный диапазон регистрируемых сейсмических сигналов на станциях локальной сети мониторинга СУР

Сочетание широкополосного оборудования и станций сильных движений позволяет исследовать геофизические процессы в широком частотном диапазоне, а дополнение сети короткопериодными сейсмическими станциями значительно повысит регистрационные возможности по мониторингу локальной сейсмичности района исследования.

Таким образом, в сентябре 2022 года была завершена интеграция всех четырех станций локальной сейсмической сети мониторинга района СУР в единую систему сбора, обработки и хранения информации СФ ФИЦ ЕГС РАН на аппаратном и программном уровне, а практическое использование указанной локальной сети по данным трёх станций было начато в апреле 2021 года [Костылев, 2021в].

4.3. Результаты полученные в 2021-2023 годах с использованием данных локальной сети сейсмического мониторинга района СУР

4.3.1. Регистрация промышленных взрывов и землетрясений в районе СУР

По результатам обработки записей волновых форм, полученных новым оборудованием в период с 22 апреля 2021 по 31 декабря 2022 гг. создан каталог сейсмических событий в районе Солнцевского угольного разреза, включающий как землетрясения, так и промышленные взрывы, производимые на Солнцевском угольном разрезе. Общее количество обработанных событий - 408, из них - 330 промышленных взрывы и 78 - землетрясения (диапазон магнитуд M_L от 0.2 до 5.0), эпицентры которых показаны на рисунке 4.11.

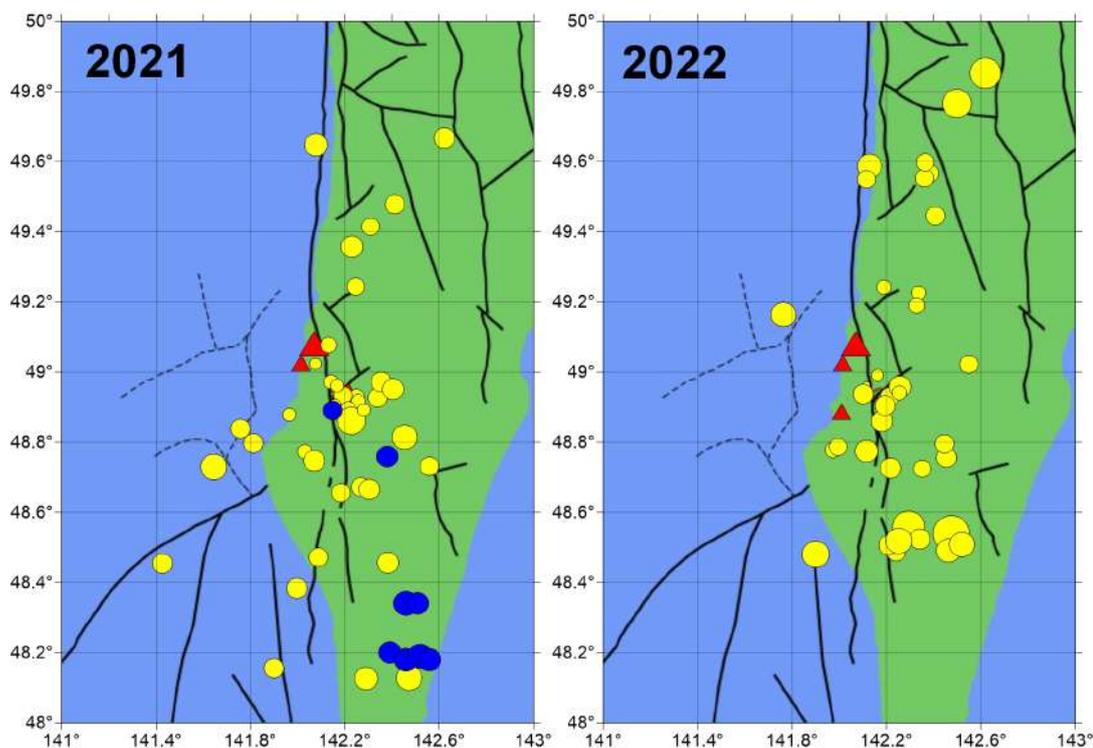
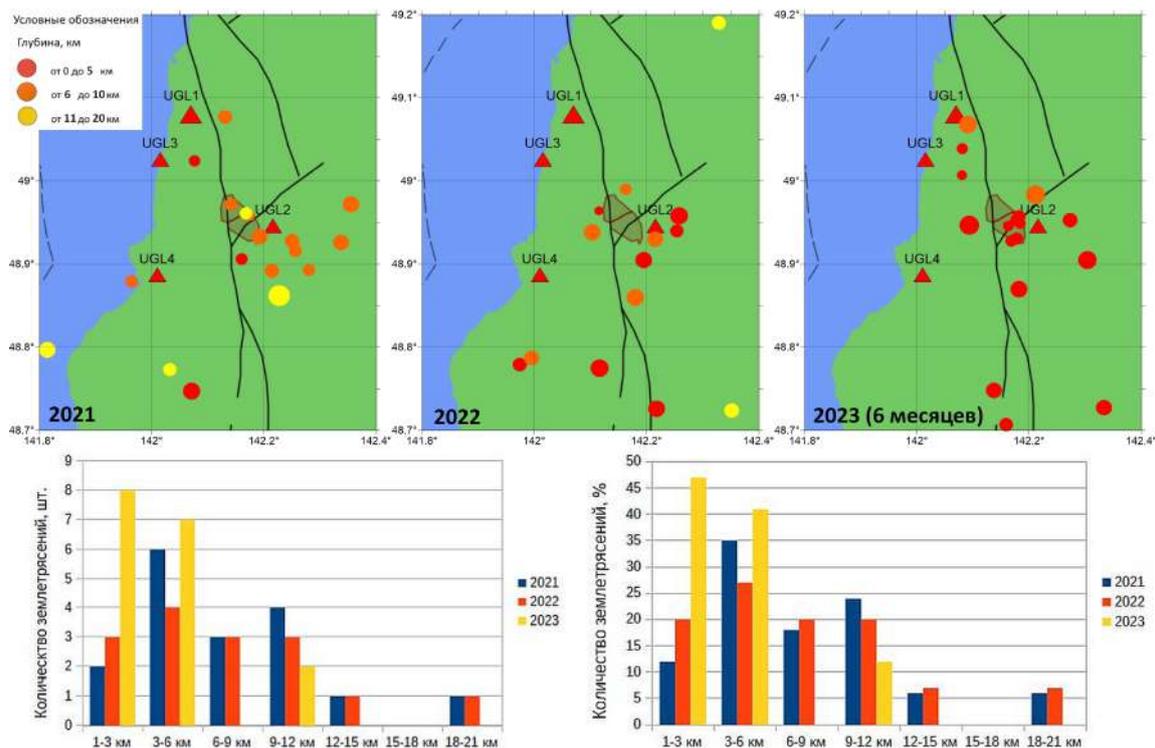


Рисунок 4.11. Эпицентры землетрясений (расстояние до 100 км от района СУР), определенные по данным локальной сети (жёлтые круги) в 2021 году (с 22.04.21 г.) и 2022 году. Синие круги - эпицентры землетрясений в период 01.01.2021 - 22.04.2021 гг. по данным региональной сети СФ ФИЦ ЕГС РАН

Обращает внимание слабая сейсмичность района в первые 4 месяца 2021 года (синие круги). Это может быть связано с действительно малым количеством землетрясений, но скорее всего ряд землетрясений, при обработке по одной станции, были определены как взрывы. Таким образом, очевидно, что ввод в эксплуатацию новых станций помогает решать проблему детерминирования взрывов и землетрясений. В результате детального анализа сейсмичности в «ближней зоне» Солнцевского угольного разреза по данным локальной сети в 2021- 2023 гг.



(первый квартал) года построены карты положения эпицентров сейсмических событий с распределением по глубине событий [Костылева, Костылев, 2023] (рисунок 4.12).

Рисунок 4.12. Эпицентры землетрясений (расстояние до 30 км от района СУР), определенные по данным локальной сети за 2021-2023 гг. (первый квартал) и диаграммы распределения сейсмических событий по глубинам (внизу)

Обращает внимание, что ежегодно уменьшается глубина гипоцентров сейсмических событий. Если в 2021 году события с глубинами 1-3 км составляли 12%, то в 2022-м - 20%, а за первую половину 2023 года уже 47%. Если же смотреть на глубины до 6 км то в 2023 году почти все землетрясения (88%) попадают в эту зону. При этом, предыдущие 2 года такие землетрясения (с глубинами гипоцентров от 1 до 6 км) составляли менее 50%.

Ввод в эксплуатацию локальной сети позволил решить проблему определения эпицентров промышленных взрывов, производимых на СУР. На рисунке 4.13 показаны

эпицентры промышленных взрывов, определенные в 2020-2022 годах. Для 2020 году (левая часть рисунка) потребовалась добавить дополнительную врезку с радиусом 30 км от карьера, где производятся взрывы, так как при определении эпицентра взрыва по данным региональной сети, использовалось, фактически, определение только по одной станции «Углегорск», что приводило к значительным погрешностям. С момента ввода в эксплуатацию локальной сети локация промышленных взрывов чётко привязана к местам проведения взрывных работ на карьере. При этом, даже можно отследить миграцию проводимых работ от южной части разреза (в 2021 году) к северо-восточной его части (в 2022 году). Полученные по данным локальной сети станции результаты 2021-2022 годов, а также переопределенные на основании наработанных решений данные по взрывам за 2019-2020 годы, систематизированы и представлены в репозитории Международного Сейсмологического Центра (ISC) [Kostyleva, Kostylev, 2023].

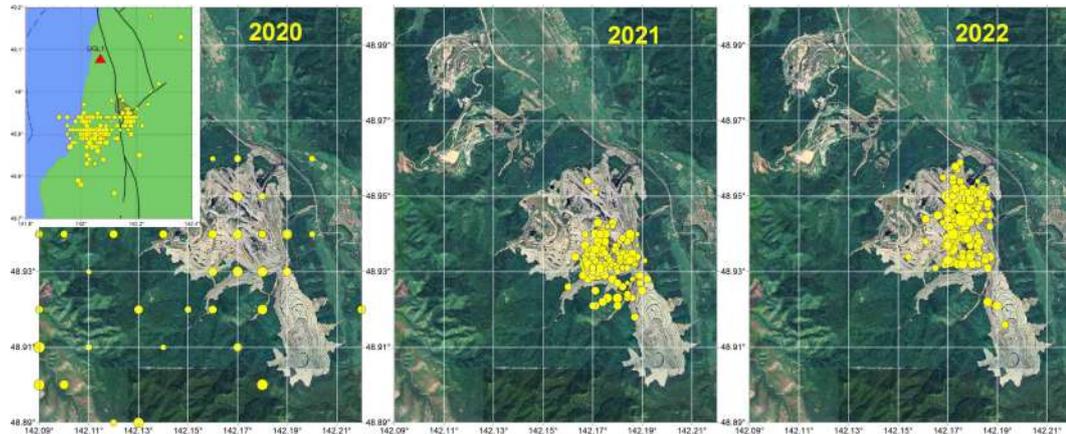


Рисунок 4.13. Эпицентры промышленных взрывов на карьере СУР в 2020-2022 годах (для 2020 года добавлена врезка с расстоянием до 30 км от района карьера), определенные по данным локальной сети (жёлтые круги) в 2021 году (с 22.04.21 г.) и 2022 году

Кроме изменения места проведения работ на карьере в 2022 году, также стоит отметить более высокие магнитуды определенные по результатам обработки записей для взрывов в 2022 году. Если в 2021 году магнитуды (M_L) находились в диапазоне 0.4-1.7, то в 2022 году уже в диапазоне 0.5-2.8. При этом 5 промышленных взрывов имели магнитуду $M_L=2.0$ и выше.

В целом, полученные значения магнитуд всех сейсмических событий, определенных в районе СУР (M_L от 0.2) подтверждают рассчитанные выше теоретические регистрационные возможности созданной локальной сети.

4.3.2. Совместное использование данных региональных сетей ФИЦ ЕГС РАН и локальной сети

К 2021 году на острове Сахалин в составе региональной сети СФ ФИЦ ЕГС РАН работало 16 стационарных сейсмических станций и пунктов наблюдений [Фокина и др., 2023]. С конца мая 2021 года по ноябрь того же года на территории Хабаровского края была развернута временная сеть станций Центрального Отделения ФИЦ ЕГС РАН, которая, в сочетании со станцией «Ванино» (VNNR), входящей в инструментальную сеть ДВО РАН [Ханчук и др., 2011] позволила существенно скорректировать субмеридиональное расположение станций на острове Сахалин для более точного определения эпицентров землетрясений в исследуемом районе (рисунок 4.14).

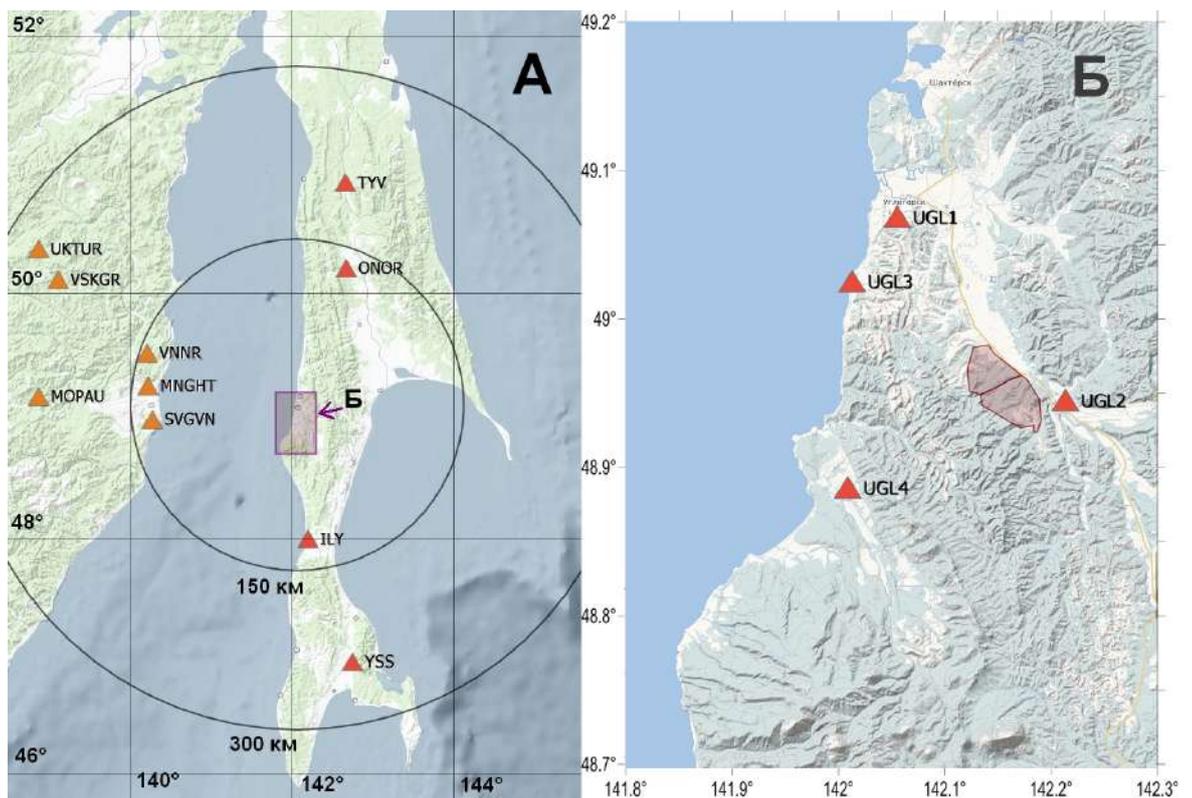


Рисунок 4.14. Сейсмические станции региональной сети (А) и территория мониторинга сейсмическими станциями локальной сети (Б)

Полный перечень оборудования станций региональной сети, показанных на рисунке 4.14а, представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3.

Перечень станций региональной сети и используемого оборудования для мониторинга района угледобычи

Код станции	Местонахождение	Тип регистратора	Тип сейсмометра	Полоса пропускания, Гц	Дата установки оборудования
Постоянные региональные станции					
VNNR	р.п.Ванино, Хабаровский край	RefTek 130-01	RefTek 151-120	0.0083 — 50	2009
UGL1	г.Углегорск, Сахалинская обл.	Guralp CMGCD	Guralp CMG-6TD	0.033 — 100	12.09.2010
YSS	г. Южно-Сахалинск, Сахалинская обл.	Quanterra Q330HR	Streckeisen STS-2.5	0.00833 — 50	29.11.2017
TYV	Пгт. Тымовское, Сахалинская обл.	DATAMARK LS-7000XT	Streckeisen STS-2	0.00833 — 50	26.06.2005
ILY	с. Ильинский, Сахалинская обл.	Guralp CMGDM	Guralp CMG-5TDE	1 — 100	06.07.2013
ONOR	с. Онор, Сахалинская обл.	Guralp CMGDM	Guralp CMG-5TDE	1 — 100	24.08.2016
Временная сеть станций в Хабаровском крае					
SVGVN	г.Советская Гавань	Guralp CMGDM	Guralp CMG-5TDE	1 — 100	19.05.2021
MNGHT	п. Монгохто, Ванинский р-н,	Guralp CMGCD	Guralp CMG-6TD	0.033 — 100	21.05.2021
MOPAU	метеостанция Мопай, Ванинский р-н	Guralp CMGCD	Guralp CMG-6TD	0.033 — 100	23.05.2021
VSKGR	р.п. Высокогорный, Ванинский р-н	Guralp CMGCD	Guralp CMG-6TD	0.033 — 100	26.05.2021
UKTUR	п. Уктур, Комсомольский р-н	Guralp CMGCD	Guralp CMG-6TD	0.033 — 100	27.05.2021

В работе [Костылев, Богинская, 2022] представлены результаты обработки записей волновых форм, полученных локальной сетью мониторинга СУР в период с 22 апреля 2021 года по 30 ноября 2021 года, а для периода май — октябрь 2021 года для обработки данных использовались также волновые формы указанных выше станций региональной сети. По результатам обработки собранных данных, создан каталог сейсмических событий в районе Солнцевского угольного разреза, включающий как землетрясения, так и промышленные взрывы, производимые на Солнцевском угольном разрезе. Общее количество обработанных событий - 164, из них - 127 промышленные взрывы и 37 - землетрясения, в том числе 26 землетрясений в радиусе 50 км от Солнцевского угольного разреза (рисунок 4.15).

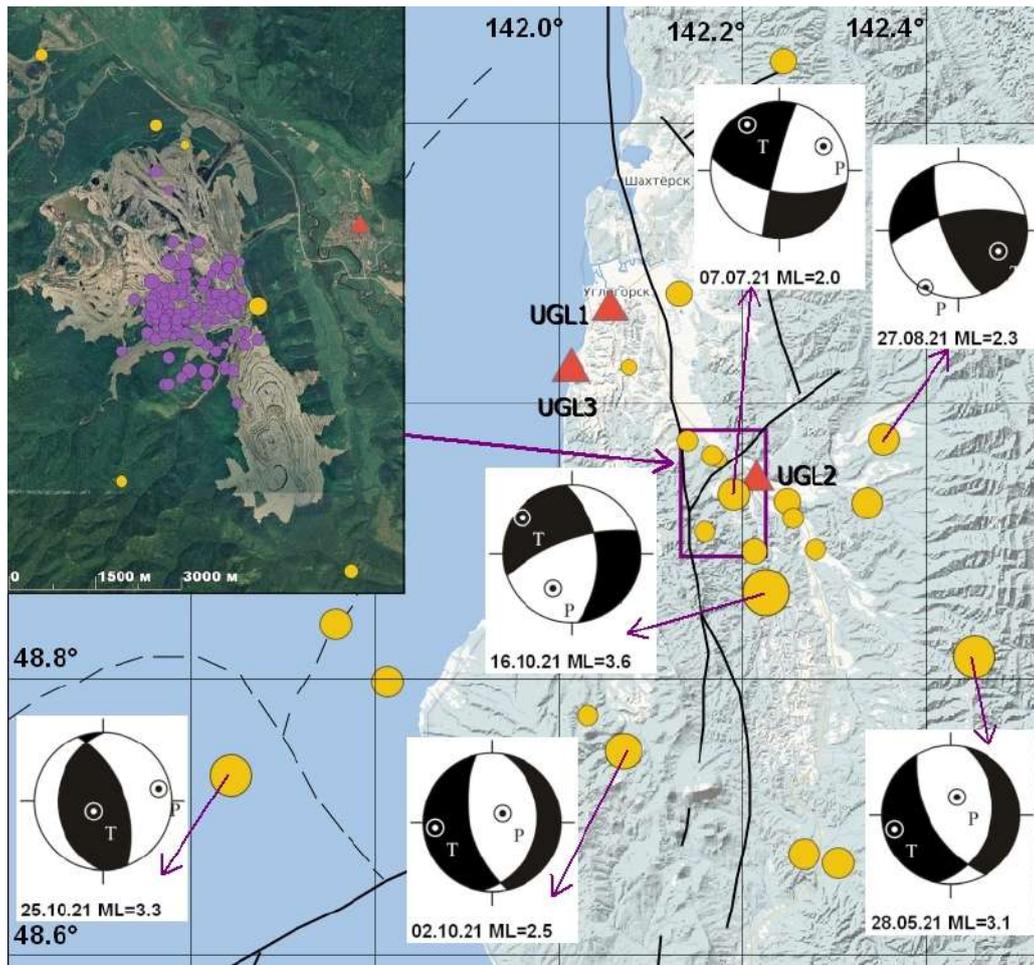


Рисунок 4.15. Положение эпицентров событий, зарегистрированных с 22.04.2021 по 30.11.2021 гг. На врезке территория Солнцевского угольного разреза. Желтые круги — землетрясения (магнитуда M_L от 0.5 до 3.6), фиолетовые круги — промышленные взрывы (магнитуда M_L от 0.4 до 1.7). Геологические структуры (разломы) нанесены на карту согласно [Петров и др., 2016]

Используя записи новых станций, а также записи других станций сейсмических сетей на Дальнем Востоке, с помощью вычислительного модуля FOCMEC, интегрированного в комплекс сейсмологических программ SEISAN [Ottmöller et al., 2011], в работе [Костылев, Богинская, 2022] были определены механизмы очагов ряда землетрясений (рисунок 4.15), произошедших в радиусе 50 км от угольного разреза в 2021 году с момента установки новых станций ФИЦ ЕГС РАН. Природа землетрясений, произошедших 28.05.2021 г. $M_L=3.1$; 02.10.2021 г. $M_L=2.5$; 26.10.2021 г. $M_L=3.3$, связана с зоной Западно-Сахалинского регионального разлома, который, в свою очередь, проявляется в виде системы взаимосвязанных сбросов и взбросов, сопровождающихся нарушениями северо-западного и северо-восточного простираний [Дымович и др., 2017]. Все три сейсмических события имеют типичные для зоны

Западно-Сахалинского разлома типы сейсмодислокаций (два сброса и один взброс) и, очевидно, обусловлены тектоническими причинами. Землетрясения, произошедшие 07.07.2021 г. $M_L=2.0$; 27.08.2021 г. $M_L=2.3$ и 16.10.2021 г. $M_L=3.6$, квалифицируются как сдвиги. Как видно из рисунка, эти сейсмические события расположены непосредственно в районе Солнцевского угольного разреза, что может говорить об изменении характера сейсмичности от естественной к смешанной природно-техногенной. В качестве подтверждения изменения характера сейсмичности и причин возникновения землетрясений в районе исследования, необходимо снова обратить внимание на сейсмодислокации двух сильнейших землетрясений, произошедших в Углегорском районе за последние 20 лет. Механизмы очага землетрясения 2000 года и самых сильных его афтершоков определены в работе [Поплавская и др., 2011] как взбросы (либо сбросы), что является характерным для большинства землетрясений, происходящих на территории острова Сахалин. Подвижка в очаге землетрясения 13 сентября 2020 года и его крупнейшего афтершока ($M_w=4.5$) реализовалась в условиях горизонтального субширотного растяжения и близгоризонтального субмеридионального сжатия и характеризуется как сдвиг [Семенова и др., 2020].

Таким образом, систематизируя полученные результаты, можно сделать вывод о правильности интеграции сейсмических данных различных сетей наблюдений для проведения мониторинга локальных сейсмоактивных территорий. Дальнейшие исследования в этом направлении должны показать с чем связаны изменения фокальных механизмов в районе угледобычи - с техногенным влиянием или же данное месторождение сформировалось на участке с аномальным напряженным состоянием.

В связи с этим, крайне перспективна интеграция данных, поступающих с новых пунктов сейсмических наблюдений и данных станций региональной сети, что позволит повысить точность определения эпицентров и взрывов, а также даст возможность проводить расчеты по определению типов механизмов очагов землетрясений для более детального понимания причин их возникновения и возможных воздействий на объекты инфраструктуры района мониторинга.

4.3.3. Использование станций локальной сети при регистрации оползневых процессов на отвалах карьера и оценки сейсмического воздействия на их устойчивость

Оползни, возникающие в результате нарушения устойчивости склонов на отвалах горнодобывающих предприятий, являются серьезной проблемой при разработке полезных ископаемых открытым способом. Список широко известных событий, связанных с

деформациями склонов отвалов был пополнен оползнем, произошедшем на Солнцевском угольном разрезе 10.07.2021 года [Кочарян и др., 2022]. Учитывая, что механика движения горных масс по склону является актуальным предметом многих исследований, наличие сейсмических станций локальной сети в непосредственной близости от произошедшего события, позволяет получить дополнительные данные для таких работ.

Станции новой сети позволяют проводить регистрацию и оценку не только землетрясений и взрывов, но и прочих геофизических процессов в районе мониторинга, например, таких как сели и оползни, характерные для отвалов открытых карьеров районов угледобычи на о. Сахалин [Музыченко, Казакова, 2020]. Так, интересные результаты получены [Kostylev, Boginskaya, 2021] поданным записей новых станций во время экологического инцидента, произошедшего на Солнцевском угольном разрезе в ночь на 10 июля 2021 г. (по сахалинскому времени) - оползня со склада временного хранения вскрышной породы угольного разреза, в результате чего, по оценкам специалистов, в долину реки сошло около двух-трех миллионов кубометров породы, что нанесло сельскохозяйственному ландшафту, лесным насаждениям и плодородному слою почвы ущерб на сумму более 135 млн рублей (рисунок 4.16) Был проведен анализ сейсмических процессов до даты оползня, так как известно, что даже малые сеймотектонические деформации могут нарушить устойчивость склонов. Было установлено, что оползнию предшествовали два взрыва - 6 и 8 июля (выделены на рисунке 4.16 красным цветом), а в период между ними (7 июля), в непосредственной близости к месту оползня, произошло сейсмическое событие с $M_L=2.0$. Используя записи новых станций, а также других станций сейсмических сетей на Дальнем Востоке, был определен механизм очага этого землетрясения [Костылев, Богинская, 2022], которому соответствует тип сейсмодислокации - сдвиг, что совпадает с механизмом Углегорского землетрясения 2020 года и не характерно для природной сейсмичности Сахалина [Kostylev et al., 2022].

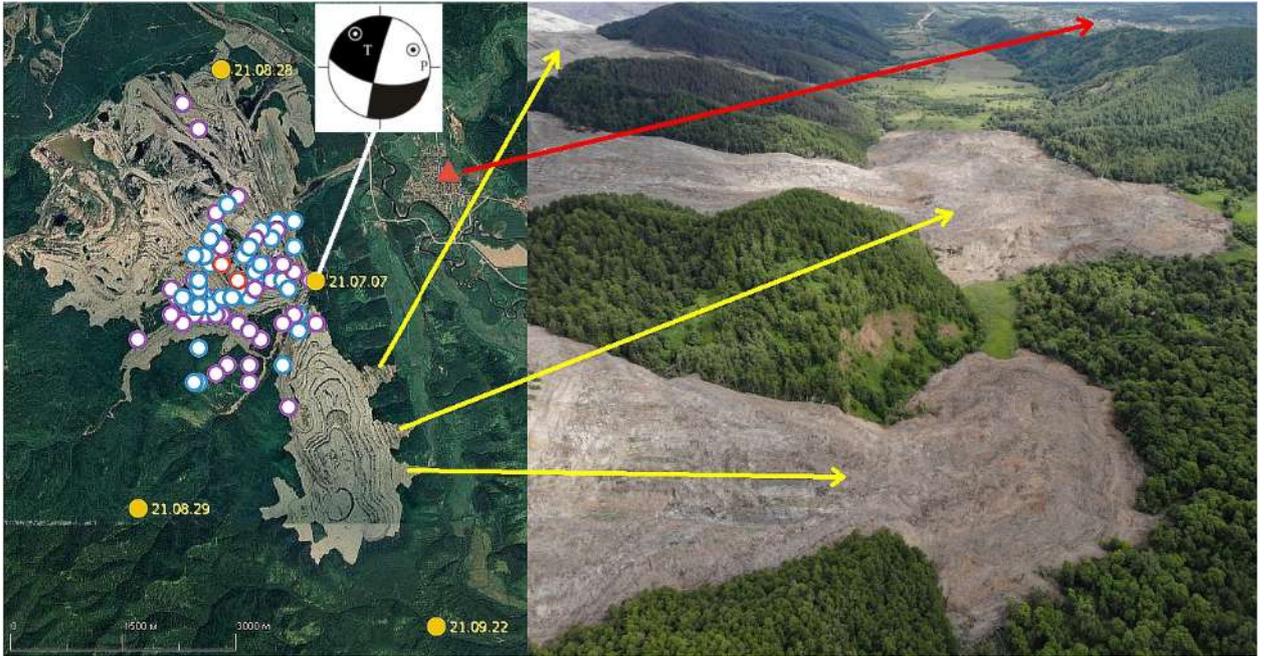


Рисунок 4.16. Слева – спутниковый снимок района Солнцевского угольного разреза (перед оползнем). Фиолетовые контуры - взрывы перед оползнем, синие - после. Желтые контуры - землетрясения в период с 22 апреля по 30 сентября. Справа фотоснимки после оползня. Красный треугольник - месторасположения станции UGL2 сети локального сейсмического мониторинга

Используя методики определения оползней на сейсмограммах [Соколова, Шепелев, 2005] определены время начала и продолжительность оползневого процесса. На рисунке 4.17 представлены волновые формы по данным станций «Краснополье» (UGL2), расположенной в 2 км от места оползня и «Мыс Хакуй» (UGL3). В результате анализа этих волновых форм авторами выделен характерный отрезок продолжительностью порядка 10 минут, со временем начала 09.07.2021 г. 12:09 UTC (или 23:09 местного времени), который можно считать записью оползневого процесса (отрезки 1-3 и 2-4 на рисунке 4.17). Анализ записей станций UGL2 и UGL3 проводился в низкочастотной области (что возможно благодаря характеристикам используемого оборудования) с фильтром 0.01-0.1 Гц. Отдельно на врезке показан участок 0-1 с фильтром 4-12 Гц. На нем видно, что по станции «Краснополье» (UGL2) можно выделить высокочастотный отрезок продолжительностью около 20 секунд, предшествующий основному (низкочастотному) процессу. Дополнительно был исследован частотный состав оползня, а также землетрясения и взрывов, ему предшествующих (рисунок 4.17 снизу). Слева на рисунке 4.17 (нижняя часть) представлены спектры Фурье для скорости грунта на станции «Краснополье» отрезков 0-1 и 1-3 по фильтрованным записям. На рисунке видно, что на низкочастотном (продолжительном участке) основной гармоникой являются частоты 0.03-0.04 Гц (период 25-30 секунд), а на

коротком (высокочастотном) участке - частоты 7-10 Гц. Справа представлены спектры Фурье для нефильТРованной (исходной) записи отрезка 0-3 по данным станции «Краснополье», а также спектры землетрясения 7 июля и взрыва 8 июля. Спектральный состав записи оползня, как и описано в работах посвященных идентификациям оползней на сейсмограммах [Соколова, Шепелев, 2005] имеет несколько локальных максимумов. Спектры же землетрясения и взрыва имеют типичные для таких событий значения и более высокочастотны.

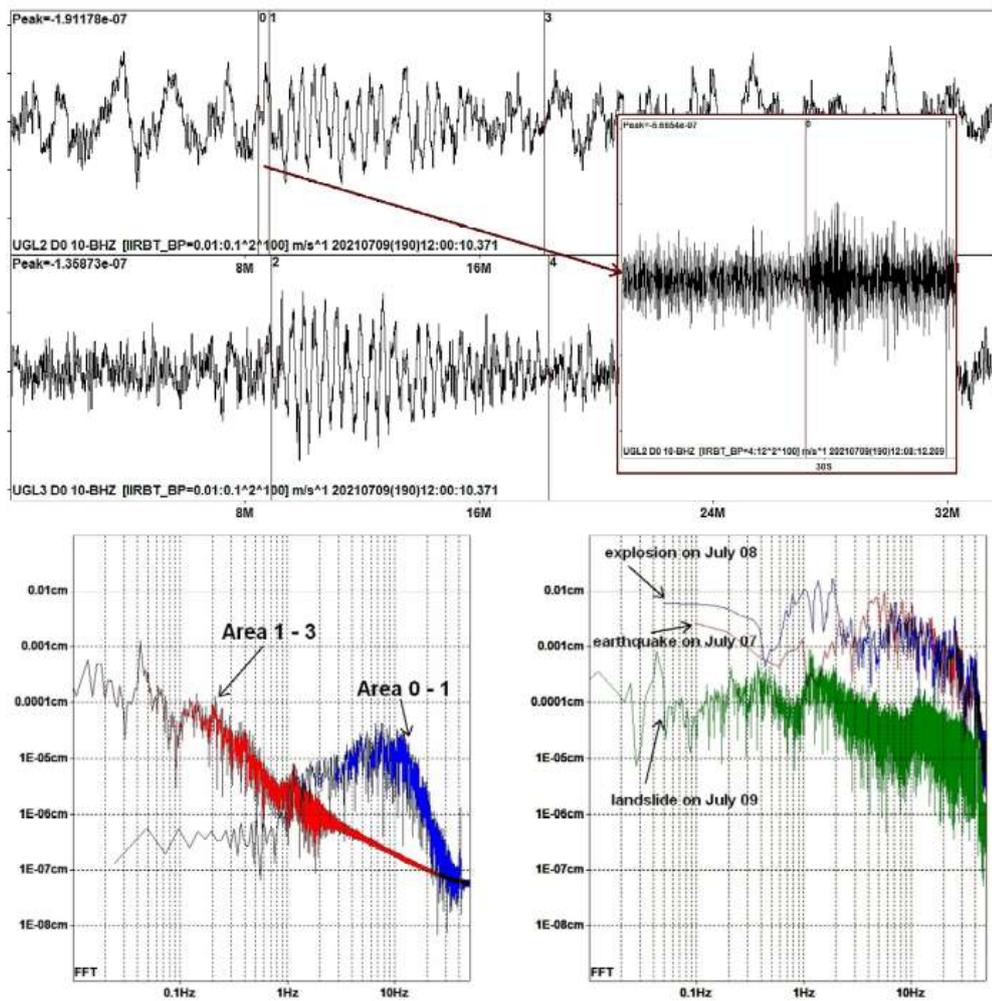


Рисунок 4.17. Волновые формы по данным станций «Краснополье» (UGL2) и «Мыс Хакуй» (UGL3) оползня 9 июля 2021 года (вверху). Спектр Фурье скорости грунта на станции «Краснополье» фильтрованных отрезков записи оползня (слева внизу) и совместный анализ спектров оползня, землетрясения и взрыва

Дальнейший анализ возможного влияния сейсмических процессов на формирование оползня 10.07.2021 г. проводился в рамках НИР [Подготовка данных..., 2021] на основании базы данных пиковых значений скорости (PGV) и ускорений (PGA) грунта в местах установки

станций локальной сети мониторинга СУР. База данных PGV (PGA) включает в себя информацию о пиковых значениях для каждого сейсмического события в районе СУР, определенных по записям событий в программном комплексе DIMAS. На основании этих данных также производится оценка расчетной интенсивности сейсмического воздействия в месте установки станции по соотношениям, приведенным в проекте новой российской сейсмической шкалы [Аптикаев и др., 2011], которая разрабатывалась на основе шкалы MSK-64 [Медведев и др., 1965] и ее модификаций. Уравнения, связывающие сейсмическую интенсивность в баллах с такими параметрами движения грунта, как ускорение и скорость, по [Аптикаев и др., 2011] имеют вид:

$$I = 2.5 \lg PGA + 1.89 \quad (4.1),$$

$$I = 2.13 \lg PGV + 4.74 \quad (4.2),$$

где I – интенсивность сотрясений, PGA – пиковое ускорение грунта, PGV – пиковая скорость грунта.

Для оценки влияния сейсмических колебаний грунта на деформацию отвала «Южный» использован каталог сейсмических событий и данные пиковых значений двух сейсмических станций локальной сети мониторинга, расположенных в непосредственной близости от территории Солнцевского угольного разреза: «Углегорск» (UGL1) и «Краснополье» (UGL2). Станция «Углегорск» (UGL1) дополнительно оснащена акселерометром Guralp CMG-5TDE, позволяющим определять значения пиковых ускорения смещения грунта (PGA) в месте установки. Фрагмент базы данных (для трёх землетрясений предшествующих оползню) по данным указанных станций, использовавшийся для оценки приведён в таблице 4.4.

Таблица 4.4.

Значения PGV, PGA и инструментальной интенсивности (I) по данным станций UGL1 и UGL2 для землетрясений 10.06.21- 10.07.21 гг.

День	Месяц	Год	Час	Минута	М	км от СУР	PGV UGL1, см/с (I)	PGA UGL1, см/с ² (I)	PGV UGL2, см/с (I)
10	6	2021	14	13	1.3	7	0.002 (0)	0.059 (0)	0.0513 (2.0)
22	6	2021	4	18	2.1	16	0.0171 (1.0)	0.087 (0)	0.0375 (1.7)
7	7	2021	8	32	2.0	0	0.0062 (0)	0.166 (0)	0.2915 (3.6)

Выделяется сейсмическое событие 07.07.2021 г., воздействие которого в районе Краснополя составило около 4х баллов. Данное событие, несмотря на сравнительно незначительную магнитуду, было уверенно определено на записях сейсмограмм 12-ти сейсмических станций на территории Сахалина и Хабаровского края, что обычно не характерно для событий с такой магнитудой.

Отдельно были проанализирована интенсивность сотрясений на территории села Краснополье от промышленных взрывов, производимых на территории карьера. В таблице 4.5 приведены значения PGV и соответствующие им значения интенсивности, полученные по формуле (2) на основании записей станции UGL2 для наиболее сильных промышленных взрывов в период за месяц до оползня.

Таблица 4.5.

Значения PGV и инструментальной интенсивности, определенных по по данным станции UGL2 для промышленных взрывов с 10.06.21 по 10.07.21 гг.

День	Месяц	Год	M_L	PGV, см/с	I, баллы
10	6	2021	1.5	0.0493	2.0
10	6	2021	1.4	0.0433	1.8
12	6	2021	1.0	0.0345	1.6
13	6	2021	1.2	0.0448	1.9
18	6	2021	1.3	0.0483	1.9
20	6	2021	1.3	0.0807	2.4
24	6	2021	1.4	0.0511	2.0
29	6	2021	1.2	0.0397	1.8
1	7	2021	0.9	0.0288	1.5
4	7	2021	1.2	0.0478	1.9
8	7	2021	1.1	0.046	1.9

Как видно из таблицы 4.5 воздействие взрывов, производимых на карьере, в большинстве случаев превосходит воздействие от землетрясений.

Все эти значения легли в основу дополнительного исследования [Анализ воздействий..., 2022], учитывающего, в том числе, степени деформации среды вблизи поверхностей, геометрии склонов и геологические свойства материалов [Кочарян и др., 2021], с использованием Метода Ньюмарка [Newmark, 1965], позволяющего построить модель динамики развития процесса скольжения.

По результатам исследования [Анализ воздействий..., 2022] было установлено, что во всех случаях значения смещения Ньюмарка не превышают величины ~ 1 см, что, в свою очередь, свидетельствует о том, что сейсмическое воздействие едва ли могло оказаться

причиной инициирования оползня. Но опыт изучения влияния похожих событий на отвалы со схожими литологическими и гидрологическими свойствами может быть недостаточный, и для заключения о достаточности зафиксированных событий на возникновение оползня требуется большее количество наблюдений. Таким образом, для получения длинных рядов данных необходимо рассматривать дальнейшую работу станции локальной сети мониторинга как непрерывно действующую сеть.

4.3.4. Использование локальной сети для контроля сейсмического воздействия промышленных взрывов

Известно, что сейсмологический мониторинг промышленных взрывов на основе анализа магнитуд и зарядов позволяет обнаруживать ошибки в выполнении короткозамедленного взрывания и принимать меры по обеспечению снижения сейсмического воздействия горных работ [Еманов А.Ф. и др., 2019]. Положительным является наличие в районе разрезов стационарной сейсмологической станции. Созданная локальная сеть мониторинга СУР позволяет выполнять работы по определению магнитуд с высокой точностью и провести сравнение полученных значений с данными о буро-взрывных работах 2020-2022 (график и объемы), предоставленными ООО «Солнцевский угольный разрез» для научно-исследовательских целей при подготовке материалов для Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска. Графики зависимости магнитуд от величины зарядов представлены на рисунках 4.18 и 4.19.

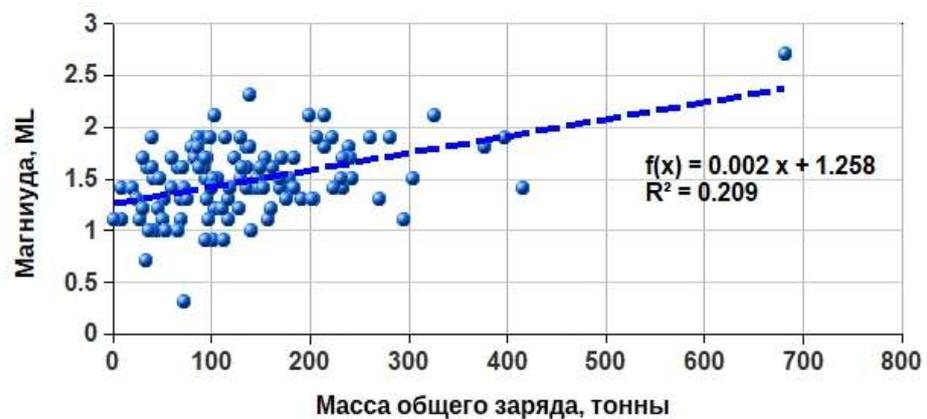


Рисунок 4.18. Зависимость локальной магнитуды от общей массы заряда короткозамедленного взрыва на СУР в период 01.01.2020 - 21.04.2021 гг.

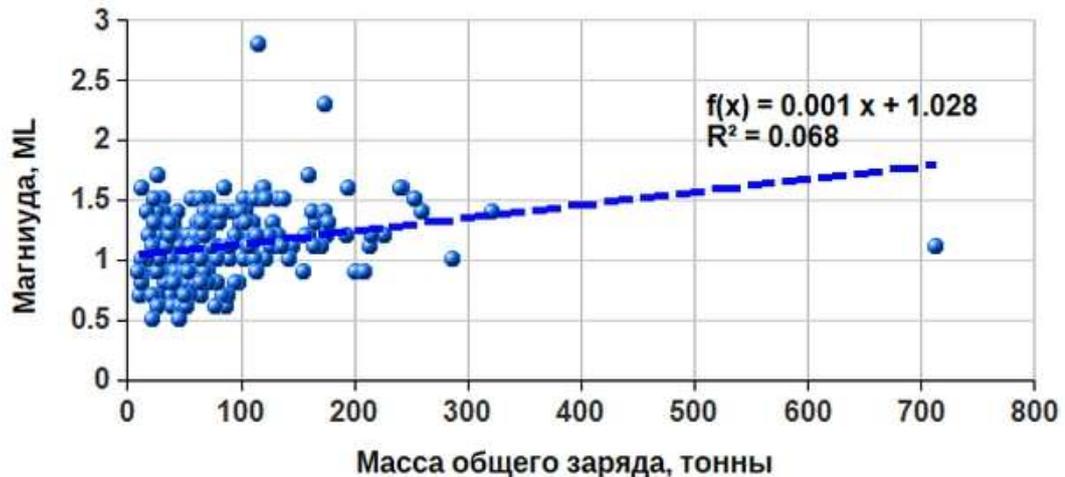


Рисунок 4.19. Зависимость локальной магнитуды от общей массы заряда короткозамедленного взрыва на СУР в период 22.04.2021 - 31.10.2022 гг.

Большое различие взрывов по магнитудам может говорить либо о нарушениях в схеме инициирования короткозамедленного взрыва, либо об ошибках, допущенных при определении магнитуды взрыва. Теоретически взрывы должны иметь сейсмический эффект, соответствующий заряду ступени и не зависящий от массы общего заряда взрыва [Еманов А.Ф. и др., 2019 (29)].

Поскольку на рисунках 4.18 и 4.19 представлены зависимости взрывов происходящих на одном и том же карьере, с одинаковыми технологиями при производстве взрывных работ, то отличия в распределениях, скорее всего объясняются именно качеством определения магнитуды. На рисунке 4.18 определение магнитуды проводилось по одной станции (UGL1) и этим, очевидно, объясняется большая дисперсия точек. Осредняющая прямая на рисунке 4.18 имеет небольшое повышение в сторону увеличения общей массы заряда. Отличительной особенностью для данного периода являются взрывы с магнитудой около 2.0, которые наблюдается во всём диапазоне общих зарядов от 30 до 400 тонн ВВ. На рисунке 4.19 представлена зависимость, полученная в результате определения магнитуд по данным всех станций локальной сети. Фактически, мы наблюдаем, что за исключением трёх событий, все события достаточно устойчиво группируются вокруг осредняющей прямой, что, с одной стороны, говорит о достаточно высокой культуре производства взрывных работ на карьере, а с другой — о очевидном повышении точности определения магнитуды за счёт использования данных, получаемых от станций локальной сети. Три события, выпадающие из общего тренда, скорее всего, объясняются следующими причинами. Взрыв в общей массой заряда более 700 тонн (магнитуда $M_L=1.1$) производился в августе 2021 года, вскоре после оползня, когда

производились работы по восстановлению деформаций карьере, произошедших в результате аварии, что подтверждается очень большим соотношением взрывчатого вещества к общей массе перемещенного грунта (около 2.0), при стандартной величине, принятого соотношения для СУР - 0.3 [Черских и др., 2022]. Два события с магнитудами 2.3 и 2.8 были зарегистрированы не только станциями локальной, но и станциями региональной сети, удаленным от карьера на сотни километров. Очевидно, мы наблюдаем в этом случае результат изменения технологии производства взрывных работ в 2022, в котором планировалось постепенное осуществление перехода на взрывание блоков с применением более глубоких скважин [Черских и др., 2022], что соответствует концепции СУР по снижению частоты взрывов при одновременной реализации мер по снижению уровня сейсмического воздействия на прилегающую территорию. Одним из возможных рациональных вариантов решений по увеличению объема взрывного блока в условиях СУР стало увеличение глубины взрывных скважин до 21 м и более относительно применяемой 11-метровой глубины, что должно по расчетам специалистов СУР привести к значительному экономическому эффекту за счет уменьшения расстояния отгона техники и механизмов от места взрыва, увеличения среднего объема взрывного блока в 1,35 раза и снижения на 24% количества массовых взрывов в среднем за месяц [Черских и др., 2023], что, в целом, находит подтверждение в результатах, полученных по данным мониторинга. На рисунке 4.20а представлены формы записи и частотные характеристики взрыва с магнитудой $M_L=2.8$, который был зарегистрирован не только локальной сетью СУР, но и региональной сетью СФ ФИЦ ЕГС РАН (8 станций, на расстоянии свыше 200 км) и для сравнения «обычный» площадной взрыв с магнитудой $M_L=1.6$ (рисунок 4.20б).

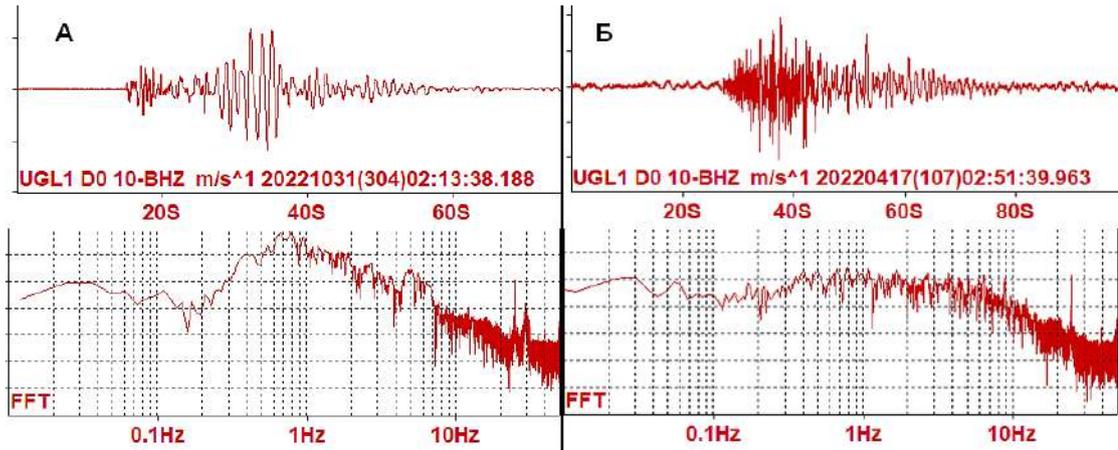


Рисунок 4.20. Формы записи и частотные характеристики для заглубленного (А) и площадного (Б) взрывов на Солнцевском угольном разрезе в 2022 году

Таким образом, зависимости, полученные с использованием данных локальной сети, позволяют проводить более глубокий анализ качества и особенностей при производстве взрывных работ на предприятиях по добыче полезных ископаемых на основании данных о сейсмическом воздействии на недра.

Выводы по главе 4

Четвертая глава рассматривает процесс создания локальной сети мониторинга района Солнцевского угольного разреза и представляет первые результаты её работы.

Описаны этапы создания локальной сети мониторинга района Солнцевского угольного месторождения — выбор и обоснование используемой аппаратуры, мест его размещения и применяемых технологических решений. Показано, что использованные аппаратные и программные средства и примененные решения при построении АПИН локальной сети мониторинга соответствуют принятым стандартам в сетях такого уровня. Всё перечисленное позволяет сделать вывод о пригодности новой локальной сети, как части региональной сети СФ ФИЦ ЕГС РАН на основании оценок регистрационных возможностей, уровня шумов, а также совместимости протоколов и форматов данных.

Таким образом, в сентябре 2022 года было завершена интеграция всех четырех станций локальной сейсмической сети мониторинга района СУР в единую систему сбора, обработки и хранения информации СФ ФИЦ ЕГС РАН на аппаратном и программном уровне.

Представлены результаты, полученные в 2021-2023 годах с использованием данных локальной сети сейсмического мониторинга района СУР по четырем аспектам:

1. Регистрация промышленных взрывов и землетрясений в районе СУР

Создан каталог сейсмических событий в районе Солнцевского угольного разреза в период с 22 апреля 2021 года по 31 декабря 2022, включающий как землетрясения, так и промышленные взрывы, производимые на Солнцевском угольном разрезе. Общее количество обработанных событий - 408, из них - 330 промышленных взрывы и 78 - землетрясения (диапазон магнитуд M_L от 0.2 до 5.0). Ввод в эксплуатацию локальной сети позволил решить проблему определения эпицентров и значительно повысить точность определения магнитуд промышленных взрывов, производимых на СУР. Полученные результаты подтвердили рассчитанные ранее теоретические регистрационные возможности созданной локальной сети.

2. Совместное использование данных региональных сетей ФИЦ ЕГС РАН и локальной сети.

Показано, что интеграция данных, поступающих с новых пунктов сейсмических наблюдений и данных станций региональной сети, позволяет повысить точность определения эпицентров и взрывов, а также даёт возможность проводить расчеты по определению типов механизмов очагов землетрясений для более детального понимания причин их возникновения и возможных воздействий на объекты инфраструктуры района мониторинга.

3. Использование станций локальной сети при регистрации оползневых процессов на отвалах карьера и оценки сейсмического воздействия на их устойчивость.

Станции новой сети позволяют проводить регистрацию и оценку не только землетрясений и взрывов, но и прочих геофизических процессов в районе мониторинга, например, таких как сели и оползни. В частности, широкополосными сеймометрами сети получены записи крупного оползня вскрышной породы на отвалах СУР 10.07.2021. Подготовленная база данных пиковых значений скорости (PGV) и ускорений (PGA) грунта в местах установки станций локальной сети мониторинга СУР использовалась в работах для анализа возможного влияния сейсмических процессов на формирование оползня 10.07.2021 г.

4. Использование локальной сети для контроля сейсмического воздействия промышленных взрывов.

Показано, что полученные с использованием данных локальной сети зависимости магнитуд от величины массы зарядов, при регистрации промышленных взрывов, позволяют проводить более глубокий анализ качества и особенностей при производстве взрывных работ на территории Солнцевского угольного разреза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных исследований получены следующие основные результаты:

1. На основании изучения динамики изменения сейсмичности района активной добычи полезных ископаемых на о. Сахалин, с точки зрения классических индикаторов для выделения в характере сейсмичности техногенной компоненты, показан переход от естественной сейсмичности к смешанной природно-техногенной сейсмичности в Углегорском районе Сахалинской области в последнем десятилетии.

2. Предложены и реализованы программно-аппаратные решения построения единого информационного поля сейсмических данных на основе сейсмических сетей различных платформ и систем сбора данных, а также разработана концепция создания унифицированного автоматизированного пункта инструментальных сейсмологических наблюдений на базе современного оборудования.

3. Описаны этапы создания локальной сети мониторинга района Солнцевского угольного месторождения — выбор и обоснование используемой аппаратуры, мест его размещения и применяемых технологических решений. Показано, что использованные аппаратные и программные средства и методика, примененные при построении локальной сети мониторинга, соответствуют принятым стандартам в сетях такого уровня. Всё перечисленное позволяет сделать вывод о пригодности новой локальной сети, как части единой системы сбора сейсмологических данных, объединяющей все сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН.

4. На основании записей станций новой системы мониторинга приведены данные о повышении качества регистрации сейсмических событий (землетрясений и промышленных взрывов), построенных механизмах сейсмических событий, а также возможностях, реализованных для контроля за прочими геофизическими процессами (оползни) и промышленными взрывами в исследуемом районе. Представленные научно-практические результаты, полученные в результате работы локальной сети в 2021-2023 гг., подтверждают применимость созданной сети как инструмента для мониторинга геофизических процессов в районе разработок полезных ископаемых.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы:

Созданная система локального мониторинга в районе Солнцевского месторождения позволяет значительно повысить точность и представительность регистрации землетрясений и установить периоды сейсмической активизации вблизи открытых горных выработок, что особенно важно, поскольку в районе мониторинга планируется расширение добычи угля открытым способом на новых месторождениях, а также располагаются многочисленные объекты инфраструктуры Сахалинской области. Это, как уже существующие транспортные и энергетические линии, так и новые проекты, среди которых крупнейший в РФ угольный конвейер протяженностью 23 км. Кроме того, готовится строительство крупнейшего на Дальнем Востоке РФ ветропарка. Такое количество участков активным антропогенным воздействием на небольшой (20×20 км) площади делает особо важным продолжение детального мониторинга данного участка, для чего необходимо размещение дополнительных станций сейсмического мониторинга.

Полученный опыт создания системы сейсмического мониторинга угольного карьера, использованные аппаратные и программные средства и решения, примененные при построении локальной сети мониторинга, подтверждают применимость созданной системы как инструмента для мониторинга геофизических процессов в районах разработок полезных ископаемых на о. Сахалин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин, В.В. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная / В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев // М: ИДГ РАН, 2015. - 364 с.
2. Адушкин, В.В. (ред.) Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / В.В. Адушкин, А.А. Маловичко // Москва: Издательство ГЕОС, 2013. – 384 с.
3. Анализ воздействий сейсмических колебаний грунта на устойчивость склонов в районе Солнцевского угольного разреза в период 09.2020 - 07.2021: отчет о НИР / **Д.В. Костылев**, Н.В. Богинская, Г.Г. Кочарян, С.Б. Кишкина // Институт Морской Геологии и Геофизики ДВО РАН: - Южно-Сахалинск, 2022 - 30 л.
4. Анализ пространственных закономерностей воздействий промышленных взрывов на эколого-геологические системы горнодобывающих районов / И.И. Косинова, Л.И. Надежка, Ф.Н. Лисецкий, В.А. Бударина, А.Е. Семенов, А.И. Павловский // Региональные геосистемы. – 2021. – Т. 45, № 3. – С. 393–413. DOI 10.52575/2712-7443-2021-45-3-393–413.
5. Андреев, И. ООО «Восточная горнорудная компания» - ориентир на АТР // Уголь. – 2014. - Т. 3, № 1056. - С. 38-39.
6. Асминг, В.Э. Калибровка скоростной модели Хибинского горного массива и прилегающей территории с помощью регистрации промышленных взрывов / В.Э. Асминг, З.А. Евтюгина, Ю.А. Виноградов // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 171-177.
7. Бачатский и Краснобродский угольные разрезы (Кузбасс) / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев, Е.В. Шевкунова, И.А. Антонов, Д.Г. Корабельщиков // Землетрясения России в 2019 году: Ежегодник. – Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2021б. – С. 123-127.
8. Вакуленко, Ю.А. Путятинские угольные копи / Ю.А. Вакуленко // Вестник Сахалинского музея. – 2004. – Т. 1, № 11. С. 418-428.
9. Вакуленко, Ю.А. Становление рабочего поселка Тельновский / Ю.А. Вакуленко // Вестник Сахалинского музея. – 2015. – Т. 1, № 22. – С. 342-368.

10. Влацкий, В.В. Мониторинг сейсмической активности на территории Южного Предуралья / В.В. Влацкий, Л.П. Маркова, А.С. Шарапов // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. – 2017. – № 2. – С. 2.
11. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь / И.П. Габсатарова, Ф.Г. Верхованцев, И.В. Голубева, Р.А. Дягилев, В.В. Карпинский, Я.В. Конечная, Д.Ю. Мехрюшев, Л.И. Надёжка, М.Ю. Нестеренко, Н.Н. Носкова, С.И. Петров, С.П. Пивоваров, С.Г. Пойгина, И.А. Санина // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2020. – С. 25-32.
12. Геологическая карта России и прилегающих акваторий масштаба 1 : 2 500 000 / О.В. Петров, А.Ф. Морозов, Т.В. Чепкасова, Е.А. Киселев, С.И. Стрельников, Ю.Б. Богданов, В.Р. Вербицкий, А.С. Вольский, А.С. Застрожных, Н.И. Гусев, А.В. Жданов, Е.К. Ковригина, В.И. Колесников, А.П. Кропачев, Б.А. Марковский, М.С. Мащак, В.Ф. Проскурнин, В.Е. Руденко, В.А. Снежко, В.И. Шпикерман, К.Э. Якобсон, В.Д. Каминский, Е.А. Гусев, Б.Г. Лопатин // ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2016. Роснедра.
13. Геологический отчет по предварительной разведке участка Южного Солнцевского бурогольного месторождения на Сахалине, проведенной в 1981–1982 гг. / Е.М. Кириллов, Л.С. Гуляева, В.В. Стрючков, М.Н. Андреева // Министерство геологии РСФСР, Сахалинское производственное геологическое объединение «Сахалингеология», Сахалинская геологоразведочная экспедиция. Южно-Сахалинск, 1982. - 131 с.
14. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования / П.А. Каменев, **Д.В. Костылев**, Н.В. Богинская, А.С. Закупин // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 390-402. Doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402. (ИФ РИНЦ: 0,806. 1.63 п.л., авторский вклад 30%)
15. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-54 – Александровск-Сахалинский. Объяснительная записка / В.А. Дымович, С.В. Евсеев, В.Ф. Евсеев, Е.Н. Нестерова, Л.С. Маргулис, А.Ф. Атращенко, И.В. Беляев, А.Н. Деркачев, В.Н. Зелепугин, А.А. Коноваленко, Е.С. Опалихина, Ю.В. Рыбак-Франко, И.В. Уткин, Г.А. Хайбулина, О.В. Желебогло, Ю.Ю. Юрченко // СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2017. - 609 с. + 5 вкл.

16. Добрынина, А.А. Распознавание слабых землетрясений и промышленных взрывов в районе Восточно-Бейского разреза (Хакасия, Россия) // А.А. Добрынина, В.И. Герман // Вестник НЯЦ РК. – 2016. – № 2. – С. 96-99.
17. Дорохина, Е.В. Шахта «Ударновская» (1924-2017 гг.) / Е.В. Дорохина // Вестник Сахалинского музея. – 2018. - Т. 1, № 25. – С. 115-127.
18. Дрознин, Д.В. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS / Д.В. Дрознин, С.Я. Дрознина // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22-34.
19. Дягилев, Р.А. Программа расчета регистрационных возможностей сейсмических сетей и групп, Sarra / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2020662170 от 09.10.2020 г. М.: РОСПАТЕНТ, 2020.
20. Дягилев, Р.А. Уникальная научная установка «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» / Р.А. Дягилев, И.А. Сдельникова // Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13, № 2. – DOI 10.5800/GT-2022-13-2-0591.
21. Еманов, А.А. Наблюдения временными сетями. Калтанский угольный разрез и шахта «Алардинская» / А.А. Еманов, А.Ф. Еманов, А.В. Фатеев // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2020. – С. 124-126.
22. Еманов, А.Ф. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, Е.В. Лескова // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 37-43.
23. Еманов А.Ф. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $M_L=6.1$, $I_0=7$ (Кузбасс) / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 48–61. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05>.
24. Закупин, А.С. Время действовать! / А.С. Закупин // Дальневосточный ученый. – 2021а. – № 6 (1666). – С. 3.
25. Закупин, А.С. Спасение утопающих.../ А.С. Закупин // Дальневосточный ученый. – 2021б. – № 15-16 (1675-1676). – С. 16.
26. Зуева, И.А. Особенности взрывной сейсмичности на территории Республики Карелия за 2017-2018 гг. / И.А. Зуева // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2019. – № 1. – С. 76-81.
27. Зуева, И.А. Современные возможности Карельской сейсмической сети для регистрации взрывной сейсмичности на территории Карелии / И. А. Зуева // Горный информационно-

- аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 9. – С. 74-86. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_9_0_74.
28. Изучение сейсмического режима на острове Матуа в комплексной экспедиции 2017 г / А.С. Закупин, И.П. Дудченко, Н.В. Богинская, **Д.В. Костылев**, П.А. Каменев // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2018. – Т. 1, № 197. – С. 161-167. (ИФ РИНЦ: 0,350. 0.88 п.л., авторский вклад 20%)
29. Инициирование обрушения склона сейсмическими колебаниями от разных источников / Г.Г. Кочарян, А.Н. Беседина, С.Б. Кишкина, Д.В. Павлов, З.З. Шарафиев, П.А. Каменев // Физика Земли. – 2021. – № 5. – С. 41-54. – DOI 10.31857/S0002333721050112.
30. Инструментальное и информационно-технологическое обеспечение сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России / А.И. Ханчук, А.В. Коновалов, А.А. Сорокин, С.П. Королёв, А.В. Гаврилов, В.А. Бормотов, М.А. Серов // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. - 2011. -Т. 157, № 3. - С. 127-137.
31. Использование критериев идентификации взрывов и землетрясений для уточнения оценки сейсмической опасности региона / В.Э. Асминг, Е.О. Кременецкая, Ю.А. Виноградов, З.А. Евтюгина // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2010. – Т. 13, № 4-2. – С. 998-1007.
32. Использование возможностей локальной сейсмической сети юга Сахалина для уточнения гипоцентрии методом сейсмотомографии / Н.В. Богинская, **Д.В. Костылев**, М. Ичиянаги, Х. Такахаша // Триггерные эффекты в геосистемах: сб. трудов Пятой Международной конференции, 4-7 июня 2019 г., г. Москва. М.:ГЕОС. - 2019. – С.31-32.
33. Каталог механизмов очагов сильных ($M \geq 6.0$) землетрясений Курило-Охотского региона 1964–2009 гг. / Л.Н. Поплавская, М.И. Рудик, Т.В. Нагорных, Д.А. Сафонов // Владивосток: Дальнаука, 2011. - 131 с .
34. Комплексный сейсмический мониторинг в районе Анивского газового месторождения / **Д.В. Костылев**, Л.М. Богомолов, П.А. Каменев, А.С. Закупин, Н.В. Богинская // Нефтегазовый комплекс: проблемы и решения: сб. трудов Первой национальной научно-практической конференции в рамках 22-й международной конференции и выставки «Нефть и газ Сахалина-2018», 25-27 сентября 2018 г., г. Южно-Сахалинск. – Южно-Сахалинск: Сахалинский государственный университет. 2020. – С. 9-10.
35. Ковальчук, Е.Г. Анализ современного состояния и перспектив развития угольной промышленности Сахалина / Е.Г. Ковальчук // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. - № 5. - 40 с.

36. Ковачев, С.А. Признаки техногенной сейсмичности на шельфе острова Сахалин / С.А. Ковачев, В.Н. Иванов, Г.К. Тимашкевич // Естественные и технические науки. – 2018. – Т. 11, № 125. – С. 145-148.
37. Корсунцев, В.Г. Сравнение магнитудных и энергетических характеристик землетрясений по записям цифровой и аналоговой аппаратуры на сейсмической станции «Южно-Курильск» / В.Г. Корсунцев // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов III Международной сейсмологической школы, 20-25 октября 2008 г., г. Кисловодск. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 71-75.
38. **Костылев, Д.В.** Состояние сейсмологической сети сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН / Д.В. Костылев // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов XI Международной сейсмологической школы, Чолпон-Ата, Кыргызстан, 12–16 сентября 2016 года. – Обнинск: Единая геофизическая служба РАН, 2016. – С. 169-172.
39. **Костылев, Д.В.** Сейсмологический мониторинг акватории Охотского моря / Д.В. Костылев, С.В. Горожанцев, Ю.Н. Левин // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов XII Международной сейсмологической школы, Алматы, Казахстан, 11–15 сентября 2017 года. – Алматы, Казахстан: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2017б. – С. 198-201.
40. **Костылев, Д.В.** Стационарные сейсмические станции и сеть цунами Сахалина в 2012 г. / Д.В. Костылев // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
41. **Костылев, Д.В.** Новый пункт комплексных геофизических и сейсмологических наблюдений на Сахалине / Д.В. Костылев // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: сб. докладов, Петропавловск-Камчатский, 01–05 октября 2019 года. – Петропавловск-Камчатский: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2019а. – С. 84-85.
42. **Костылев, Д.В.** Система комплексных геофизических наблюдений в зоне активного разлома Южного Сахалина / Д.В. Костылев, П.А. Каменев // Триггерные эффекты в геосистемах: сб. трудов V Международной конференции, Москва, 4-7 июня 2019 г. М.:ГЕОС, 2019б. – С.102-103.
43. **Костылев, Д.В.** Формирование единой системы сбора сейсмологической информации в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН / Д.В. Костылев // Российский сейсмологический

журнал. – 2021а. – Т. 3, № 1. – С. 41-53. – DOI 10.35540/2686-7907.2021.1.03. (ИФРИНЦ: 1,150. 1.63 п.л., авторский вклад 100%)

44. **Костылев, Д.В.** Пункты сейсмологических наблюдений в составе аварийно-спасательных центров МЧС РФ на Курильских островах / Д.В. Костылев // Геодинамические процессы и природные катастрофы: сб. трудов IV Всероссийской научной конференции с международным участием, 06–10 сентября 2021 года, Южно-Сахалинск. – Южно-Сахалинск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2021б. – С. 66.
45. **Костылев, Д.В.** Первые результаты работы системы сейсмического мониторинга района Солнцевского угольного разреза (о. Сахалин) / Д.В. Костылев // Геодинамические процессы и природные катастрофы: сб. трудов IV Всероссийской научной конференции с международным участием, Южно-Сахалинск, 06–10 сентября 2021 года. – Южно-Сахалинск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2021в. – С. 67.
46. **Костылев, Д.В.** Подготовка данных о сейсмичности района Солнцевского угольного разреза в период 01.01.2021 - 10.07.2021 года: отчет о НИР / Д.В. Костылев, Н.В. Богинская // Институт Морской Геологии и Геофизики ДВО РАН: Южно-Сахалинск, 2021г. - 19 л.
47. **Костылев, Д.В.** Сейсмический мониторинг района угледобычи на О. Сахалин с использованием временных сетей ФИЦ ЕГС РАН / Д.В. Костылев, Н.В. Богинская // Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13, № S2. – С. 1-6. – DOI 10.5800/GT-2022-13-2s-0634. (0,75 п.л., вклад автора 60%, импакт-фактор SJR – 0,293)
48. Костылева, Н.В. О характере протекания сейсмического процесса в районе активной угледобычи на о. Сахалин по данным детальным наблюдений / Н.В. Костылева, **Д.В. Костылев** // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов XVII Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С.57.
49. Красилов, С.А. Оснащение ИОЦ ВКМ программно-аппаратными средствами для организации наблюдений в режиме, близком к реальному времени, на примере сейсмостанции «Сторожевое» / С.А. Красилов, А.М. Семенов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов II Международной сейсмологической школы, 13-17 августа 2007 г., г. Пермь. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 117-120.

50. Левин, Ю.Н. Архитектура системы сбора сейсмологических данных Сахалинского филиала ГС РАН / Ю.Н. Левин, Д.В. **Костылев** // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов Девятой Международной сейсмологической школы, Республика Армения, 08–12 сентября 2014 года. – Республика Армения: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизическая служба Российской академии наук, 2014. – С. 197-199.
51. Лимаренко, В. И. Старейшая отрасль Сахалина / В. И. Лимаренко // Уголь. – 2022. – № 8(1157). – С. 56-57.
52. Ловчиков, А.В. Некоторые закономерности сейсмичности, индуцированной горными работами, установленные при отработке Ловозерского редкометального месторождения / А.В. Ловчиков // Современные проблемы механики сплошных сред. – 2011. - № 13. С. 109-118.
53. Малоапертурная сейсмическая антенна «Михнево»: новые возможности изучения сейсмичности Восточно-Европейской платформы / И.А. Санина, О.А. Черных, О.Ю. Ризниченко, С.Г. Волосов /. Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 428, № 4. – С. 536-541.
54. Маловичко, А.А. Сейсмологический мониторинг на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей / А.А. Маловичко, Д.А. Маловичко, Р.А. Дягилев // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 25-29.
55. Медведев, С.В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64 / С.В. Медведев, В. Шпонхойер, В. Карник // М.:МГК АН СССР, 1965. - 11 с.
56. «Михнево»: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории / В.В.Адушкин, В.М.Овчинников, И.А.Санина, О.Ю. Ризниченко // Физика Земли. – 2016. – № 1. – С. 108–119. – DOI 10.7868/S0002333715060010.
57. Мишаткин, В.Н. Технические средства сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами / В.Н. Мишаткин, Н.З. Захарченко, В.Н. Чебров // Сейсмические приборы. – 2011. – Т. 47, № 1. – С. 26-51.
58. Мониторинг сейсмичности Южного Сахалина по данным локальной сети сейсмических станций / Е.П. Семенова, Д.В. **Костылев**, С.В. Горожанцев, Ю.Н. Левин // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов XIII Международной сейсмологической школы, Душанбе, 11–15 сентября 2018 года. – Душанбе: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2018а. – С. 252-255.

59. Мониторинг сейсмических процессов в калийных рудниках: результаты наблюдений и перспективы развития / Р.А. Дягилев, Д.Ю. Шулаков, А.В. Верхоланцев, С.В. Глебов // Горный журнал. - 2013. - № 6.
60. Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере «Шахтау» / А.В. Верхоланцев, Р.А. Дягилев, Д.Ю. Шулаков, А.В. Шкурко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 2. – С. 59-69. – DOI 10.15372/FTPRPI20190207.
61. Морозов, А.Н. Метод идентификации взрывной сейсмичности на территории Архангельской области / А.Н. Морозов // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2008. – Т. 1, № 11. – С. 177-184.
62. Музыченко, Л.Е. Антропогенные сели на Сахалине / Л.Е. Музыченко, Е.Н. Казакова // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4, № 3. – С. 359-368. – DOI 10.30730/gtrz.2020.4.3.359-368.
63. Мукамбаев, А.С. Сейсмичность взрывных работ на территории Республики Казахстан / А.С. Мукамбаев, Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – Вып. 4. – С. 124–130.
64. Недра Сахалинской области. Южно-Сахалинск: ООО «Издательство «Сахалин–Приамурские ведомости», 2013. - 120 с.
65. Николаев, А.В. Проблемы наведенной сейсмичности / А.В. Николаев // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. – С. 5-15.
66. Николаев, А.В. О возможном влиянии разработки нефти на параметры Нефтегорского землетрясения / А.В. Николаев // Информационно-аналитический бюллетень Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Спецвыпуск: Нефтегорское землетрясений 27-28 мая 1995 г. М.: ОИФЗ РАН, 1995. – С. 218-221.
67. О роли тектонических нарушений в развитии наведенной сейсмичности от совместного воздействия открытых и подземных работ по добыче угля / А.А.Еманов, А.Ф. Еманов, А.В. Фатеев // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 27-35. – DOI 10.33764/2618-981X-2019-2-2-27-35.
68. Объединенная система контроля состояния Хибинского горного массива на базе сетей сейсмических станций Кольского филиала ГС РАН и ОАО «Апатит» / М.В.Аккуратов, В.Э.Асминг, Ю.А.Виноградов, П.А.Корчак // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов Шестой Международной сейсмологической школы, 15–19 августа 2011 года, Апатиты. – Апатиты: Федеральное

- государственное бюджетное учреждение науки Геофизическая служба Российской академии наук, 2011. – С. 7-10.
69. Огаджанов, А.В. Локальная сейсмичность района Саратовского геодинамического полигона / А.В. Огаджанов, М.Ю. Маслова // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2017. – № 89. – С. 60-65.
70. Огаджанов В.А. Саратовский геодинамический полигон. Землетрясения Северной Евразии в 2003 году / А.В. Огаджанов, М.Ю. Маслова, В.А. Огаджанов // Обнинск: ГС РАН, 2009.– С. 222–226.
71. Одновременное воздействие открытых и подземных горных работ на недра и наведенная сейсмичность / А.А.Еманов, А.Ф. Еманов, А.В. Фатеев, Е.В. Лескова // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2017. – Т. 44, № 4. – С. 51–62. doi: 10.21455/VIS2017.4-3.
72. Омурбек кызы, К. Сейсмический мониторинг взрывов на Центральном участке месторождения «Кумтор» Тянь-Шаня / К. Омурбек кызы, М. Омуралиев // Российский сейсмологический журнал.– 2020. – Т. 2, № 4. – С. 83–99. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.08>
73. Оморское землетрясение с $M_w=5.8$ 14 августа 2016 Г. (центральный Сахалин). Инструментальные наблюдения в эпицентральной зоне / Е.П. Семенова, Д.А. Сафонов, **Д.В. Костылев**, Ю.Н. Левин // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов XII Международной сейсмологической школы, Алматы, Казахстан, 11–15 сентября 2017 года. – Алматы, Казахстан: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2017. – С. 328-332.
74. ООО «УК «Сахалинуголь» Уголь Сахалина - время возрождения // Уголь. -2011. - 8(1024). – С. 56-57.
75. ООО «Восточная горнорудная компания» 2020 год - старт на пути к 20 млн тонн в год // Уголь. – 2021. - 3(1140). – С. 62-63.
76. Оскорбин, Л.С. Уравнения сейсмического поля сахалинских землетрясений / Л.С. Оскорбин // В кн.: Сейсмическое районирование Сахалина. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. - 34–45.
77. Оскорбин, Л.С. Сейсмогенные зоны Сахалина и сопредельных областей / Л.С. Оскорбин, А.О. Бобков // В кн.: Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997а. – С. 154–178. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 6).

78. Оскорбин, Л.С. Макросейсмическое проявление землетрясений на территории южной части Дальнего Востока/ Л.С. Оскорбин, А.О. Бобков // Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997б. - С. 45-64.
79. Основы системы сейсмологического мониторинга Кузбасса / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев, В.В. Ситников, Е.В. Лескова, Д.Г. Корабельщиков, А.В. Дураченко // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015б. – Т. 2, № 2. – С. 68-72.
80. Оценка регистрационных возможностей сейсмической станции «Колба» для мониторинга западного сектора Российской Арктики / Г.Н. Антоновская, Е.Р. Морозова, Я.В. Конечная, К.Б. Данилов // Сейсмические приборы. – 2022. – Т. 58, № 4. – С. 130-143. – DOI 10.21455/si2022.4-8.
81. Оценка сейсмичности южного Сахалина по методике СОУС'09 / Е.П. Семенова, **Д.В. Костылев**, В.И. Михайлов, И.А. Паршина, В.Н. Ферчева // Геосистемы переходных зон. – 2018б. – Т. 2, № 3. – С. 191-195. – DOI 10.30730/2541-8912.2018.2.3.191-195. (ИФРИНЦ: 0,806. 0.63 п.л., авторский вклад 30%)
82. Преимущества и области применения сейсмических приборов для прямой установки в грунт / О.Г. Разинков, Д.Д. Сидоров-Бирюков, В. Townsend, Т. Parker, G. Bainbridg, R. Greis // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: сб. трудов Шестой научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 01–07 октября 2017 года. – Петропавловск-Камчатский: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2017. – С. 371-375.
83. Проект новой российской сейсмической шкалы / Ф.Ф. Аптикаев, О.О. Эртелева, Ю.А. Бержинский, М.А. Клячко, Г.С. Шестоперов, А.Л. Стром // Инженерные изыскания. - 2011. - № 10. - С.62–71.
84. Прытков, А.С. Дислокационная модель очага Углегорского землетрясения 2000 Г. (о. Сахалин) / А.С. Прытков, Н.Ф. Василенко // Тихоокеанская геология. – 2006. – Т. 25, № 6. – С. 115-122.
85. Развитие малоапертурной сейсмической антенны «Михнево» для решения новых сейсмологических задач / С.И. Сергеев, С.А. Королев, С.Г. Волосов, О.П. Кузнецов // Научное приборостроение. – 2017б. – Т. 27, № 1. – С. 35-39. – DOI 10.18358/np-27-1-i3539.
86. Развитие сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России. Результаты, проблемы, перспективы / Е.И. Гордеев, А.А. Маловичко, В.Н. Чебров, Л.В. Гунбина, Ю.Н. Левин // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока

- России: в сб. трудов II Региональной научно-технической конференции, 11-17 октября 2009 г., Г. Петропавловск-Камчатский. - П.-К.: ГС РАН, 2010. – С. 29-33.
87. Разинков, О.Г. Сейсмометрические системы безопасности гидротехнических и иных инженерных сооружений на базе аппаратуры GEOSIG / О.Г. Разинков, Д.Д.Сидоров-Бирюков // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов XVI Международной сейсмологической школы, Минск, 12–16 сентября 2022 года. – Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2022. – С. 86.
88. Раннее обнаружение сейсмической активности в районах проведения горных работ с использованием малоапертурных сейсмических антенн / С.И. Сергеев, И.А. Санина, С.А. Королев, С.Г. Волосов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2017а. - № 10. – С. 167-177. – DOI 10.25018/0236-1493-2017-10-0-167-177.
89. Регистрационные возможности временной сейсмологической сети ИДГ РАН на ВЕП / А.Г. Гоев, С.Г. Волосов, И.А. Санина, Н.Л. Константиновская, М.А. Нестеркина // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 2. – С. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.08>
90. Результаты и перспективы сейсмологических наблюдений в центральной части Байкальского рифта / Ц.А. Тубанов, П.А. Предеин, Л.Р. Цыдыпова, Д.П. Санжиева, Н.А. Радзиминович, А.Д. Базаров // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 4. – С. 38–57. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.03>
91. Рогожин, Е.А. (ред.) Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР-2015 / Е.А. Рогожин // - 2015. - <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/a3b/izm-1-k-sp-14.pdf>.
92. Санина, И.А. Особенности идентификации карьерных взрывов в центральной части Восточно-Европейской платформы по данным малоапертурной группы «Михнево» / И.А. Санина, Н.Л. Константиновская // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 2. – С. 23-32. – DOI 10.35540/2686-7907.2022.2.02.
93. Сапрыгин, С.М. Разломы и волноводы в недрах Сахалина / С.М. Сапрыгин // Геосистемы переходных зон. – 2017. – Т.4, № 1. – С. 47-52. doi:10.30730/2541-8912.2017.1.4.047-052.
94. Сафонов, Д.А. Онорское землетрясение 14 августа 2016 г. с $M_w=5.8$ (о. Сахалин) / Д.А. Сафонов, Е.П. Семенова // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016-2017 гг.). – С. 294–303. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.27.

95. Сахалин / Т.А. Фокина, Л.Н. Поплавская, И.А. Паршина, М.И. Рудик, Д.А. Сафонов // Землетрясения Северной Евразии в 2003 г. – 2009. – С. 166-172.
96. Сейсмический мониторинг района г. Осинники (Кемеровская область) / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, Е.В. Лескова, Ю.А. Колесников, А.В. Фатеев, А.Ю. Семин // Землетрясения России в 2005 году. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 63–65.
97. Сейсмический мониторинг на полуострове Ямал / Ю.А. Виноградов, А.В. Федоров, М.С. Пятунин, А.М. Милехина // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов XIV Международной сейсмологической школы Республика Молдова, 09–13 сентября 2019 года, г. Обнинск // Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2019. – С. 28.
98. Сейсмичность Алтае-Саянского региона в 2016–2017 гг. / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев, Е.В. Шевкунова, В.Г. Подкорытова // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 129–136. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.11.
99. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году / Д.А. Сафонов, **Д.В. Костылев**, Т.А. Фокина, Н.С. Коваленко // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 146-159. – DOI 10.30730/grtz.2020.4.2.146-159. (ИФ РИНЦ: 0,806. 1.75 п.л., авторский вклад 30%)
100. Сейсмологические исследования на территории Алтае-Саянской горной области / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев, В.М. Соловьев, Е.В. Шевкунова, Е.А. Гладышев, И.А. Антонов, Д.Г. Корабельщиков, В.Г. Подкорытова, В.В. Янкайтис, С.А. Елагин, Н.А. Серёжников, А.В. Дураченко, А.И. Артемова // Российский сейсмологический журнал. – 2021а. – Т. 3, № 2. – С. 20–51. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.02>.
101. Сейсмологические исследования на территории Европейского Севера России и прилегающих районов Арктики. Основные результаты научно-исследовательских работ за период 1992-1996 гг. / В.Э. Асминг, С.Н. Гурьева, И.А. Кузьмин, Е.О. Кременецкая, А.С. Коломиец, В.М. Тряпицын, Ю.В. Федоренко // Апатиты: КНЦ РАН, 1996. - 44 с.
102. Сейсмологический мониторинг промышленных взрывов как эффективный подход к контролю сейсмического воздействия на недра / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, Н.А. Серёжников, А.В. Фатеев, У.Ю. Ворона, Е.В. Шевкунова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 56-66. – DOI 10.33764/2618-981X-2019-2-2-56-66.
103. Семенова, Е.П. Особенности проявления афтершоковой деятельности сильных сахалинских землетрясений / Е.П. Семенова // Проблемы сейсмичности и современной

- геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири: сб. трудов регионального сейсмологического симпозиума, 1–4 июня 2010, Хабаровск. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2010. - С. 273–275.
104. Семенова, Е.П. Изучение афтершоковых последовательностей сахалинских землетрясений с помощью обобщенного закона Омори / Е.П. Семенова, А.В. Коновалов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов VI Международной сейсмологической школы, 15–19 авг. 2011, Апатиты. Обнинск: ГС РАН, 2011. - С. 311–315.
105. Семенова, Е.П. Крильонское землетрясение 25 ноября 2013 г. с $M_w = 5.2$, $I_0=6-7$ (о. Сахалин) / Е.П. Семенова, Д.А. Сафонов, Т.А. Фокина // Землетрясения Северной Евразии, 22. 2013. – С. 466–476.
106. Семенова, Е.П. Углегорское землетрясение 13 сентября 2020 года (о. Сахалин): предпосылки возникновения и результаты наблюдений в эпицентральной зоне / Е.П. Семенова, Н.В. Богинская, **Д.В. Костылев** // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т.4, № 4. – С. 474-485 <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485>. (ИФ РИНЦ: 0,806. 1.5 п.л., авторский вклад 50%)
107. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г / В.Н. Чебров, Д.В. Дрознин, Ю.А.Кугаенко, В.И.Левина, С.Л.Сенюков, В.А. Сергеев, Ю.В.Шевченко, В.В. Ящук // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 18. – DOI 10.7868/S0203030613010021.
108. Система мониторинга наведенной сейсмичности Кузбасса и триггерные эффекты в развитии сейсмического процесса / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев, Е.В. Лескова, Д.Г. Корабельщиков, А.В. Дураченко // Триггерные эффекты в геосистемах: сб. трудов Третьего Всероссийского семинара-совещания ИДГ РАН, 16–19 июня 2015 г., Москва. – М.:ГЕОС, 2015а. – С. 190–199.
109. Система сбора, обработки, хранения и представления сейсмологических данных и результатов их обработки в СП СПЦ, технические средства, алгоритмы и ПО / В.Н. Чебров, Д.В. Дрознин, В.А. Сергеев, Е.А. Пантюхин // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: сб. трудов II региональной научно-технической конференции. – П.-К.: ГС РАН, 2010. – С. 332-336.
110. Слабые землетрясения и промышленные взрывы, зарегистрированные на Восточно-Европейской платформе в пределах территории Украины в 2005-2010 гг. / Ю.А. Андрущенко, В.В. Кутас, А.В. Кендзера, В.Д. Омельченко // Геофизический журнал. – 2012. Т. – 34, № 3. С. 49-60.

111. Современное состояние сейсмологических наблюдений в СФ ФИЦ ЕГС РАН / **Д.В. Костылев**, Ю.Н. Левин, Е.П. Семенова, Н.В. Богинская // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: сб. трудов Шестой научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 01–07 октября 2017 года. – Петропавловск-Камчатский: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2017а. – С. 357-360.
112. Соколова, И.Н. Идентификация оползней на сейсмограммах / И.Н. Соколова, О.М. Шепелев // Вестник НЯЦ РК. - 2005. – Т. 2, № 22. - С. 165-168.
113. Соколова, И.Н. Техногенно-индуцированные сейсмические события на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона по данным полевых наблюдений / И.Н. Соколова, Н.Н. Михайлова, А.Е. Великанов // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 4. – С. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.01>.
114. Солнцевский разрез - флагман дальневосточной угледобычи // Уголь. – 2019. - 3(1116). – С. 36-39.
115. Соловьев, С.Л. Землетрясения на Сахалине/ С.Л. Соловьев, Л.С. Оскорбин, М.Д. Ферчев. М.: Наука, 1967. - 180 с.
116. Спирин, А.И. Сейсмическая станция «Южно-Сахалинск». 60 лет отечественным инструментальным наблюдениям на Сахалине / А.И. Спирин, Ю.Н. Левин // Южно-Сахалинск – Обнинск: ГС РАН, 2008. – 32 с.
117. Старовойт О.Е. Сейсмическая сеть Российской Академии наук / О.Е. Старовойт // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений (Информационно-аналитический бюллетень). – М.: МЧС РФ и РАН, 1994. – №1 – С. 25-33.
118. Старовойт, О.Е. Участие России в международных проектах по сейсмическим наблюдениям / О.Е. Старовойт, И.П. Чернобай // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений (Информационно-аналитический бюллетень). – М.: МЧС РФ и РАН, 1994. – № 2. – С. 33-40.
119. Стрельцов, В.К. Перспективы развития угольной отрасли Сахалинской области до 2015-2020 гг. / В.К. Стрельцов // Разведка и охрана недр. – 2010. - № 12. – С. 34-37.
120. Сычева, Н.А. Сравнение динамических параметров землетрясений различных регионов / Н.А. Сычева // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2017. –Т.17, № 12. – С. 205-210.
121. Тихонов, И.Н. О наведенной сейсмичности на шельфе острова Сахалин вблизи Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения / И.Н. Тихонов // Вестник

- Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2010. – Т. 3, № 151. – С. 59-63.
122. Точность локации эпицентров сейсмических событий по данным малоапертурной сейсмической группы «Михнево»: нужны ли дополнительные сейсмические станции? / И.А. Санина, С.Г. Волосов А.Г. Гоев, Н.Л. Константиновская, М.А. Нестеркина, С.А. Тарасов // Геофизические исследования. – 2020. – Т. 21, № 2. – С. 48-60. – DOI 10.21455/gr2020.2-4.
123. Углегорско-Айное землетрясение 4 августа 2000 года с $M_S=7.0$, $i_0=8-9$ (Сахалин) / Л.Н. Поплавская, Т.В. Нагорных, Т.А. Фокина и др. // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году: Сборник научных трудов. Обнинск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизическая служба Российской академии наук, 2006. – С. 265-284.
124. Урал / А.А. Маловичко, Р.А. Дягилев, Д.А. Маловичко, Ф.Г. Верхованцев, И.В. Голубева // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизическая служба Российской академии наук, 2012. – С. 238-246.
125. Уточненная формула для определения радиуса опасной зоны по разлету отдельных кусков горной массы при взрывании скважинных зарядов / О.И. Черских, А.А. Галимьянов, С.И. Корнеева, В.И. Мишнев // Уголь. – 2023. – № 5(1167). – С. 50-54. – DOI 10.18796/0041-5790-2023-5-50-54.
126. ФГИС «Единый фонд геологической информации о недрах» как основа цифровой трансформации недропользования / Д.Б. Аракчеев, Е.М. Юон, И.В. Захаркин, С.Г. Шахназаров // Геология нефти и газа. – 2021. – № 3. – С. 21-29. – DOI 10.31087/0016-7894-2021-3-21-29.
127. Фокина, Т.А. Приамурье и Приморье, Сахалин и Курило-Охотский регион / Т.А. Фокина, **Д.В. Костылев**, Ю.Н. Левин // Землетрясения России в 2019 году. Ежегодник. Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2021. – С. 52-60.
128. Фокина, Т.А. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2018-2019 гг / Т.А. Фокина, Д.А. Сафонов, **Д.В. Костылев** // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – № 26(2018-2019). – С. 154-170. – DOI 10.35540/1818-6254.2023.26.13. (ИФ РИНЦ: 0,732. 2.13 п.л., авторский вклад 33%)
129. Чебров, В.Н. Региональная система сейсмического мониторинга / В.Н. Чебров // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: сб.

- трудов IV региональной научно-технической конференции, 29 сентября - 5 октября 2013 г., г. Петропавловск-Камчатский. – П.-К.: ГС РАН, 2013. – С. 8-15.
130. Четырёхуровневая система сейсмического мониторинга на территории Среднего Урала / А.А. Маловичко, Р.А. Дягилев, Д.А. Маловичко, Д.Ю. Шулаков, П.Г. Бутырин, Ф.Г. Верхоланцев // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 8-17.
131. Черских, О.И. Совершенствование буровзрывных работ на Солнцевском угольном разрезе / О.И. Черских, А.А. Галимьянов, К.В. Гевало // Уголь. – 2022. – № 7(1156). – С. 45-52. – DOI 10.18796/0041-5790-2022-7-45-52.
132. Щукин, М.А. Информационная система СФ ФИЦ ЕГС РАН / М.А. Щукин, **Д.В. Костылев** // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов XV Международной сейсмологической школы, Новосибирск, 06–10 сентября 2021 года. – Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2021. – С. 108.
133. Элементы структуры и фазы развития афтершокового процесса Чуйского землетрясения / А.А.Еманов,Е.В. Лескова, А.Ф. Еманов, А.В. Фатеев// Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 29–36.
134. Эффект снижения трения в основании гравитационного оползня под действием сейсмических колебаний / Г.Г. Кочарян, З.З. Шарафиев, С.Б. Кишкина, Чен Чжи Ци // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 2. – С. 3-14. – DOI 10.15372/FTPPI20220201.
135. Adushkin, V.V. Tectonic earthquakes of anthropogenic origin / V.V. Adushkin // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2016. - V.52, No 2. – P. 173-194. <https://doi.org/10.1134/S1069351316020014>.
136. Adushkin, V.V. Technogenic tectonic seismicity in Kuzbass / V.V. Adushkin // *Russian Geology and Geophysics*. – 2018. – V. 59, No 5. – P. 571-583. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.04.010>.
137. Activity stages and tectonic division in the Kuznetsk Basin, Southern Siberia / I.S. Novikov, O.V. Cherkas, G.M. Mamedov, Y.G. Simonov, T.Y. Simonova, V.G. Nastavko // *Russian Geology and Geophysics*. - 2013. – V. 54, No. 3. – P. 324-334. DOI: 10.1016/j.rgg.2013.02.007.
138. Case Studies // Sakhalin Oil and Gas, Russia. URL: <https://www.geosig.com/EEW---Sakhalin-Oil-and-Gas--Russia-pg90.aspx> (дата обращения: 27.02.2023).
139. Davis, P. The IDA Near Real-Time System / P. Davis, J. Berger, D. Chavez // *IRIS Newsletter*. – 1999. – V. 18, No. 1. – P. 5-6.

140. Dobrynina, A.A. Source parameters of the earthquakes of the Baikal rift system. *Izvestiya / A.A. Dobrynina // Physics of the Solid Earth*. - 2009. – V. 45, No. 12. - P. 1093-1109. – DOI 10.1134/S1069351309120064
141. Ellsworth, W.L. Injection-induced earthquakes / W.L. Ellsworth // *Science*. – 2013. – V. 341. – P. 1-7.
142. Emanov, A.A. Monitoring of Seismic Activation in the Area of the Kaltan Open Pit and Alardinskaya Mine (Kuzbass) / A.A. Emanov, A.F. Emanov, A.V. Fateev // *Seismic Instruments*. - 2020. – No. 56. – P. 82-92. <https://doi.org/10.3103/S0747923920010053>
143. Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE / Stefan Baisch, Ralf Fritschen, Jörn Groos, Toni Kraft, Tiffany Plenefisch, Katrin Plenkers, Joachim Ritter, , Joachim Wassermann // *DGG Mitteilungen*. - 2012. – No. 3. – P. 17-31.
144. Evaluation for hypocenter estimation error in the southwestern Kuril trench using Japan and Russia joint seismic data / M. Ichiyanagi, H. Takahashi, V. Mikhaylov, **D. Kostylev**, Y. Levin // *Earth, Planets and Space*. – 2020. – Vol. 72, No. 1. – P. 86. – DOI 10.1186/s40623-020-01215-0. (0,88 п.л., вклад автора 25%, импакт-фактор JCI – 0,800)
145. Features of focal mechanisms of mining-induced earthquakes: a case study of the Fushun Laohutai coal mine, Liaoning Province / Tie J. Li, Meifeng Cai, Yan Zuo, Yuequan Liu // *Geological Bulletin of China*. – 2005. – V. 24, No. 2. – P. 136-144.
146. Gardner, J.K. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? / J.K. Gardner, L. Knopoff // *Bull. of the Seismological Society of America*. – 1974. – V. 64, No. 5. – P. 1363-1367.
147. Gee, L.S. The Global Seismographic Network: U.S. / L.S. Gee, W.S. Leith // *Geological Survey Fact Sheet*. – 2011. – V. 3021. – 2 p.
148. Global review of human-induced earthquakes / G.R. Foulger, M. Wilson, J. Gluyas, B.R. Julian, R. Davies // *Earth-Science Reviews*. – 2018. – No. 178. – P. 438-514.
149. Groos, J. Seismic noise: A challenge and opportunity for seismological monitoring in densely populated areas / J. Groos, J. Ritter // *In Proceedings of the workshop: Induced Seismicity, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 2010*. – No. 30. – P. 87–97. doi:10.5445/IR/1000038621.
150. High Quality Induced Seismic Monitoring: Strategies and Applications / Dario Baturan, Emrah Yenier, Andrew Law, Sepideh Karimi // March 7-11, 2016. Conference: GeoConvention 2016 At: Calgary, Alberta. – P. 1-5. https://geoconvention.com/wp-content/uploads/abstracts/2016/209_GC2016_High_Quality_Induced_Seismic_Monitoring.pdf

151. Horton, S. Disposal of hydrofracking water fluid by injection into a subsurface aquifer triggers earthquake swarm in central Arkansas with potential for damaging earthquakes / S. Horton // *Seismological Research Letters*. – 2012. - V. 83. - P. 250-260.
152. Hutt, C. Installation of Yuzhno-Sakhalinsk / C. Hutt // *IRIS Newsletter*. – 1993. – V. 12, No. 1. – P. 12-17.
153. Igonin, N. A Comparison of Surface and Near Surface Acquisition Techniques for Induced / N. Igonin, A. Poulin, D.W. Eaton // *Seismicity and Microseismic Monitoring*. – 2017. – V. 1. – P. 1-5. Published by European Association of Geoscientists & Engineers
154. Impact of sensor installation techniques on seismic network performance / M. Laporte, G. Bainbridge, D. Baturan, P. Devanney // *EGU2015 SM1.2/GI1.5 session*. - 2015.
155. Kim, W.Y. Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio / W.Y. Kim // *Journal of Geophysical Research*. – 2013. - V. 118 - P. 3506-3518.
156. **Kostylev, D.V.** About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type / D.V. Kostylev, L.M. Bogomolov, N.V. Boginskaya // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Yuzhno-Sakhalinsk, May 27–31, 2019*. – Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. - V. 324. - P. 012009. DOI 10.1088/1755-1315/324/1/012009. (0,88 п.л., вклад автора 40%, импакт-фактор SJR – 0,199)
157. **Kostylev, D.V.** The first results of the seismic monitoring system of the Solntsevsky open pit coal mine area (on Sakhalin Island) / D.V. Kostylev, N.V. Boginskaya // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 4, Yuzhno-Sakhalinsk, 06–10 Sep. 2021*. - Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Physics Publishing, 2021. – P. 012002. – DOI 10.1088/1755-1315/946/1/012002. (0,75 п.л., вклад автора 75%, импакт-фактор SJR – 0,199)
158. **Kostylev, D.V.** Seismic Activity in the Focus of the Ulegorsk Earthquakes, Sakhalin Island, Related to Intensive Development of Coal Deposits / D.V. Kostylev, N.V. Boginskaya, A.S. Zakupin // *Pure Appl. Geophys.* – 2022. – No. 179. – P. 4221–4232. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02933-6>. (1,5 п.л., вклад автора 60%, импакт-фактор JCI – 0,570)
159. Kostyleva, N. Catalog of industrial explosions in the coal mining area on Sakhalin Island (Russia) for 2019-2022 / N. Kostyleva, **D. Kostylev** // *ISC Seismological Dataset Repository*. - 2023. <https://doi.org/10.31905/PCCATGI2>

160. Masafumi, M. Tankō de ikiru hitobito (Those Who do CoalMining), Karafuto 40 nen no rekishi (40 years of Sakhalin History) / M. Masafumi // Tokyo: All Japan Federation of Karafuto. - 2017. – P. 157-196.
161. McNamara, D.E. Seismic Noise Analysis System, Power Spectral Density Probability Density Function: Stand-Alone Software Package / D.E. McNamara, R.I. Boaz // United States Geological Survey Open File Report. – 2005. – V. 1438. – P. 30.
162. Mining-induced seismicity at open pit mines in Kuzbass (Bachatsky earthquake on June 18, 2013) / A.F. Emanov, A.A. Emanov, A.V. Fateev, E.V. Leskova, E.V. Shevkunova, V.G. Podkorytova // Journal of Mining Science. – 2014. – V. 50, No. 2. – P. 224–228. <https://doi.org/10.1134/S1062739114020033>
163. Miyamachi, H. Construction of the broadband seismic network in Far Eastern Russia for imaging the stagnant slab / H. Miyamachi, M. Ichianagi, T. Maeda // Geophysical Bulletin of Hokkaido University. Sapporo. Japan. – 2009. – No. 72. – P. 37-49.
164. Newmark, N.M. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments / N.M. Newmark // Geotechnique. - 1965. – V. 15, No. 2. – P. 139–160.
165. Noise Toolkit PDF-PSD Noise Toolkit PDF/PSD bundle // IRIS DMC (2014), Data Services Products [Site]. – URL: <https://doi.org/10.17611/DP/NTK.2>.
166. On the genesis of the 2013 Bachat earthquake / G.G. Kocharyan, S.B. Kishkina, A.M. Budkov, G.N. Ivanchenko // Geodynamics and Tectonophysics. – 2019. – V. 10, No. 3. – P. 741-759. doi:10.5800/GT2019.10.30.439
167. Ottemöller, L. SEISAN earthquake analysis software: for Windows, Solaris, Linux and MacOSx / L. Ottemöller, P. Voss, J. Havskov. 2011 - URL: <https://www.uib.no/rg/geodyn/artikler/2010/02/software>
168. Peterson, J. Observations and modeling of seismic background noise / J. Peterson // U.S. Geol. Survey Open-File Report. - 1993. – P. 93-322.
169. Preparing to Monitor and Distinguish Natural and Induced Seismicity near Norman Wells, Northwest Territories / Scott Cairns, Honn Kao, Amir Farahbod, D.B. Snyder // CSEG RECORDER. – 2014. – No. 39. – P. 34-39.
170. Razinkov, O. Interfacing GEOSIG seismic instruments with SEISAN software / O. Razinkov // SEISAN WORKSHOP Bergen, Norway 13-17 October 2008.
171. Recommendation for the discrimination of human-related and natural seismicity / T. Dahm, D. Becker, M. Bischoff et al. // J Seismol. - 2013. – No. 17. – P. 197-202. <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9295-6>

172. Recommended Practices for Managing Induced Seismicity Risk Associated with Geologic Carbon Storage; NRAP-TRS-I-001-2021; DOE.NETL-2021.2839; NRAP Technical Report Series; U.S. / D. Templeton; M. Schoenball; C. Layland-Bachmann; W. Foxall; Y. Guglielmi; K. Kroll; J. Burghardt; R. Dilmore; J. White // Department of Energy, National Energy Technology Laboratory: Pittsburgh, PA, 2021. - P 80. DOI: 10.2172/1834402.
173. Rubinstein, J.L. The 2013-2016 induced earthquakes in Harper and Sumner counties, southern Kansas / J.L. Rubinstein, W.L. Ellsworth, S.L. Dougherty // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2018, - V. 108. - P. 674-689.
174. Seismic Impact of Industrial Blasts in Western Siberia and Induced Seismicity / A.F. Emanov, A.A. Emanov, A.V. Fateev et al. // Seismic Instruments. – 2019. – No. 55. – P. 410-426. <https://doi.org/10.3103/S0747923919040066>
175. Simultaneous Impact of Open-Pit and Underground Mining on the Subsurface and Induced Seismicity / A.A. Emanov, A.F. Emanov, A.V. Fateev et al. // Seismic Instruments. – 2018. – No. 54. – P. 479-487. <https://doi.org/10.3103/S0747923918040035>
176. Sharp increase in central Oklahoma, USA: Links between wastewater injection / K.M. Keranen, M. Weingarten, G.A. Abers, B.A. Bekins, S. Ge // Science. – 2014. - V. 345. - P. 448-451.
177. Shchukin, M. Informational field of GS FRS RAS observational system / M. Shchukin, **D. Kostylev**, E. Semenova // 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes (JKASP-2018). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, August 20-26. P. 207.
178. The 2001-present induced earthquake sequence in the Raton Basin of northern New Mexico and southern Colorado / J.L. Rubinstein, W.L. Ellsworth, Arthur McGarr, H.M. Benz // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2014. - V. 104. - P. 2162-2181.
179. The technogenic Bachat earthquake of June 18, 2013 (ML=6.1) in the Kuznetsk Basin – the world’s strongest in the extraction of solid minerals / A.F. Emanov, A.A. Emanov, A.V. Fateev, E.V. Leskova // Seismic Instruments. – 2017. – V. 53, No. 4. – P. 333–355. <https://doi.org/10.3103/S0747923917040041>.
180. The Dallas-Fort Worth earthquake sequence: October 2008 through May 2009 / C. Frohlich, C. Hayward, B. Stump, E. Potter // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2011. - V. 101. - P. 327-340.
181. The human-induced earthquake database / M.P. Wilson, G.R. Foulger, J.G. Gluyas, R.J. Davies, B.R. Julian // HiQuake:. Seismological Research Letters. – 2017. – V. 88, No. 6. – P. 1560-1565.

182. Utsu, T. Statistical study on the occurrence of aftershocks / T. Utsu // *Geophysics*. - 1961. – No. 30. – P. 521–605.
183. Utsu, T. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity / T. Utsu, Y. Ogata, R.S. Matsu'ura // *Journal of Physics of the Earth*. - 1995. – No. 43. – P. 1–33. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.43.1>
184. Urabe, T. WIN-A program on workstation for support of manual phase picking process on seismograms recorded by microearthquake observation network, Programme and Abstract / T. Urabe, S. Tsukuda // *Seism. Soc. Japan*. – 1992. – No. 2. – P. 41.
185. Wiemer, S. A software package to analyze seismicity: ZMAP / S. Wiemer // *Seism. Res. Lett.* - 2001. – No. 72. – P. 373-382.
186. Yakovlev, D.V. Natural and induced seismic activity in Kuzbass / D.V. Yakovlev, T.I. Lazarevich, S.V. Tsirel' // *Journal of Mining Science*. – 2013. – V. 49, No. 6. – P. 862-872. – DOI 10.1134/S1062739149060038
187. Yenier, E. Induced-seismicity monitoring: Broadband seismometers and geophone comparison / E. Yenier, M. Laporte; D. Baturan // *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016*, 5034–5038. doi:10.1190/segam2016-13970947.1.