

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена в лаборатории сейсмологии
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель – *Еманов Александр Фёдорович, доктор технических наук*

Официальные оппоненты – *Кулаков Иван Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», профессор Центра науки и технологий добычи углеводородов*

– *Китов Иван Олегович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, лаборатория сейсмологических методов исследования литосферы, ведущий научный сотрудник*

– *Алёшин Игорь Михайлович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, лаборатория геоинформатики, заведующий, главный научный сотрудник*

Защита диссертации состоится 1 ноября 2024 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3108>

Автореферат разослан «30» сентября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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. Таким образом, в целом, на о. Сахалин была решена задача проведения мониторинга природной сейсмичности на региональном уровне. Однако во многих исследованиях¹ 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. 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 Постановлению Правительства Российской Федерации 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. Неоднородность распределения сейсмически активных зон в стране обуславливает необходимость использования трех уровней наблюдений: телесеismicкого, регионального и локального². 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

¹ Адушкин, В.В. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная / В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев // М: ИДГ РАН, 2015. - 364 с.

² 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.

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 сетей³.

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

³ 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.

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, в качестве основной системы обработки;

- программный пакет для анализа сейсмичности ZMAP для работы с каталогами землетрясений и выполнения декластеризации афтершоковых последовательностей;

- вычислительный модуль FOCMEC комплекса сейсмологических программ SEISAN для расчета и отображения фокальных механизмов;

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

- программа расчета регистрационных возможностей сейсмических сетей и групп SARA;

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). Используемые 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 ИМ-ГиГ 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 Сахалин-2018» (2018, г. Южно-Сахалинск);

6. 10th Biennial work shop 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 отчетов 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).

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 128 листах, включает в себя 50 рисунков, 10 таблиц, 187 библиографических ссылок.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и основные задачи работы, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены проявления наведенной сейсмичности около горнодобывающих предприятий. Подчеркнута 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. Выделены основные уровни мониторинга — национальный, региональный и локальный. Показано, что лучшие примеры создания сейсмологических сетей контроля наведенной сейсмичности предусматривают создание систем двухуровневого мониторинга на основе сочетания локальных и региональных сетей.

Во второй 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.

В настоящее время крупнейшим угледобывающим предприятием Сахалинской области является ООО «Восточная горнорудная компания» (ВГК) основным ресурсом которой является «Солнцевский угольный разрез» (СУР). При этом вся добыча ведется открытым способом. Вышеуказанные изменения в объемах добычи угля при проведении вскрышных работ, не могли не отразиться на изменении рельефа окружающих территорий (рисунок 1) (**п.2.1**).

Район угледобычи располагается в зоне Западно-Сахалинского разлома, сейсмическая активность которого достаточно высока. В его зоне наблюдалось несколько землетрясений с $M > 5.0$ (рисунок 2), крупнейшим из которых было Углегорско-Айнское, 2000 г. ($M_w = 7.0$; 9 баллов), а за последние 20 лет наибольший резонанс получило сейсмическое событие с магни-

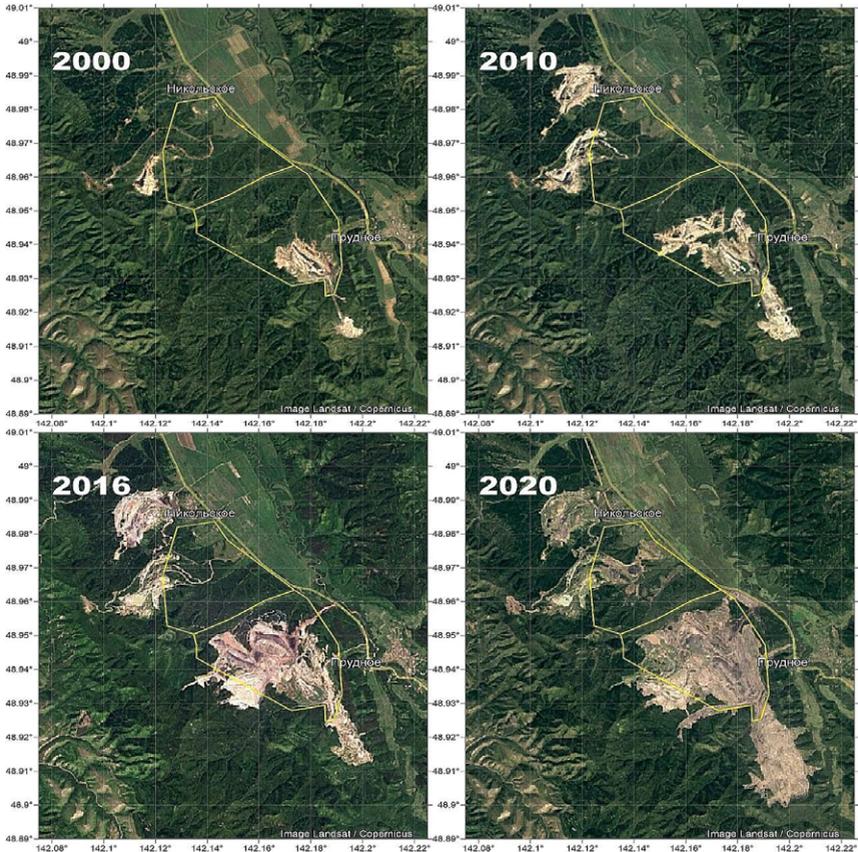


Рисунок 1 - Спутниковые снимки района СУР за 2000-2020 гг. Жёлтым контуром показаны лицензионные участки ООО «Солнцевский угольный разрез».

тудой $M_L=4.8$ 13 сентября 2020 г., произошедшее непосредственно в районе активной разработки угольных месторождений.

Землетрясение с магнитудой $M_L=4.8$ произошло 13 сентября 2020 г. в Углергорском районе Сахалинской области и вызвало сотрясения силой до 5 баллов по шкале сейсмической интенсивности MSK-64 в ближайших населенных пунктах (**п.2.2**). При исследовании этого землетрясения были отмечены нехарактерные для естественной сейсмичности Сахалина параметры⁴.

⁴ Семенова Е.П., Богинская Н.В., Костылев Д.В. Углергорское 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.

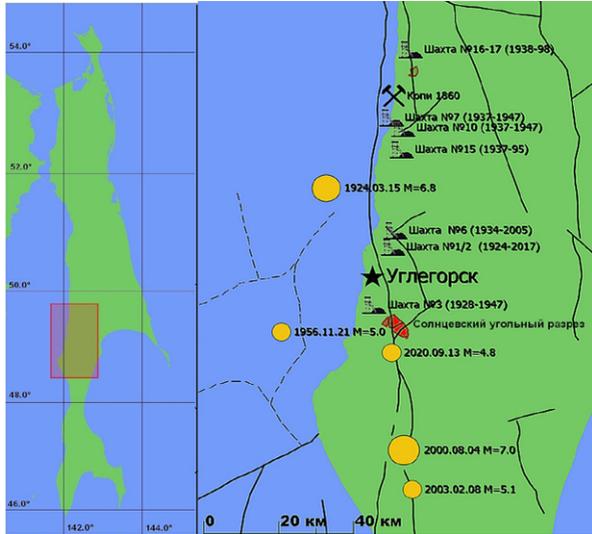


Рисунок 2 - Расположение исследуемого района. Слева: область исследования на карте о. Сахалин; справа: тектонические разломы, красным цветом и значками обозначены районы угольдобычи, желтыми кружками показаны сильнейшие сейсмические события в исследуемом районе.

В п.2.3 исследовано изменение сейсмичности района, в условиях активизации добычи полезных ископаемых открытым способом, на предмет выявления индикаторов техногенного отклика в последние 20 лет и изменения пространственного распределения эпицентров землетрясений в период 2000-2010 и 2011-2020 гг. (рисунок 3)⁵.

Как видно, расположение эпицентров сейсмических событий в период 2000-2010 годов (слева на рисунке 3) приурочено преимущественно к разломным структурам. 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 3). Подобное сочетание позволяет говорить об усилении сейсмичности района в последние годы и изменении её характера от естественной к смешанной природно-техногенной сейсмичности.

Третья глава посвящена созданию региональной сети СФ ФИЦ ЕГС РАН на острове Сахалин. Рассмотрены принципы формирования и развития системы сбора сейсмологических данных в Сахалинском

⁵ Kostylev, D.V., Boginskaya, N.V. & Zakupin, A.S. Seismic Activity in the Focus of the Uglegorok Earthquakes, Sakhalin Island, Related to Intensive Development of Coal Deposits // Pure and Applied Geophysics. – 2022. – No. 179. – P. 4221–4232.

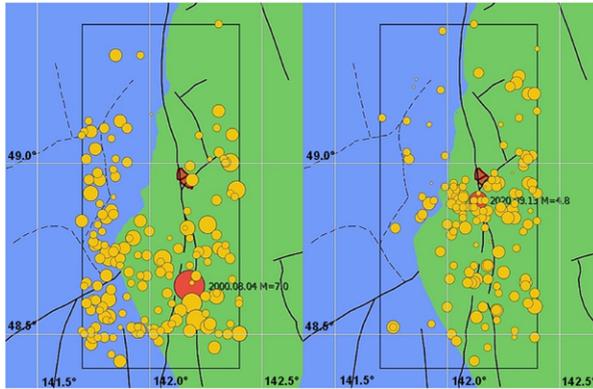


Рисунок 3 - Эпицентры землетрясений в 2000-2010 гг. (слева) и 2011-2020 гг. (справа). Выделен (красный полигон) участки Солнцевского угольного разреза и сильнейшие землетрясения каждого десятилетия (красный цвет).

филиале (п.3.1)⁶. Показано, что текущая конфигурация сети сейсмических станций, с учетом имеющегося оборудования и привлечения в оперативном режиме данных станций соседних регионов, позволяет обеспечить в исследуемом районе возможность регистрации землетрясений начиная с представительной магнитуды $M_{min}=2.5$ ⁷, 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. Для обеспечения интеграции создаваемой сети необходимо соответствие её архитектуры существующей системе сбора сейсмологических данных. Эта система включает в себя: коммуникационную подсистему (каналы связи-передачи данных, протоколы передачи данных, программное обеспечение (ПО)); подсистему обработки сейсмических сигналов, программные средства контроля системы сбора, а также средства предоставления и отображения данных и результатов их обработки.

В п.3.2 описана интеграция сетей регионального и локального уровня, которая обеспечивается использованием единой системы сбора, позволяющей решать вопросы по подключению новых станций и серверов сейсмологических служб в различных форматах передачи данных, а также получать доступ к данным независимо от оборудования и исходных форматов источников этих данных, включая данные международных сейсмо-

⁶ 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.

⁷ 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.

логических центров⁸. Общая структура сети сбора данных с детализацией задач, решаемых серверами сбора и обработки, представлена на рисунке 4.

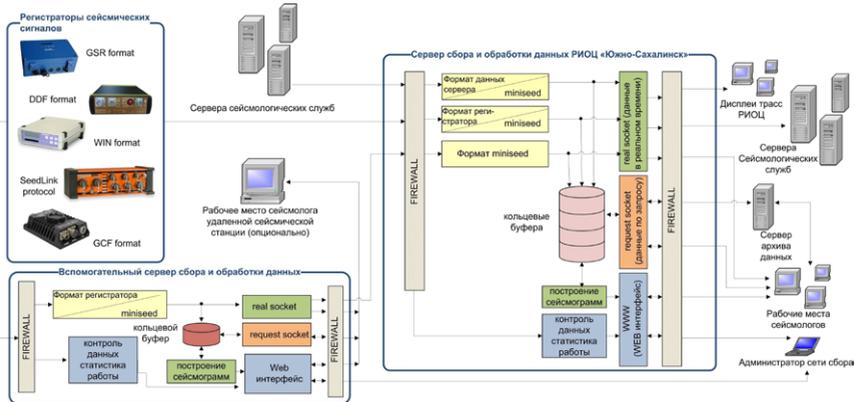


Рисунок 4 - Структурная схема сети сбора и обработки сейсмологических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН.

В п.3.3 изложена концепция автономного пункта инструментальных наблюдений (АПИИ), как основа для создания сейсмических станций сетей любого уровня: регионального, локального, а также полевых и временных сетей. 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 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 5).

В п.3.4 представлен опыт автора в реализации АПИИ разного уровня – начиная от полевых пунктов наблюдений⁹ и станций временных сетей¹⁰, до стационарных станций с полным комплектом представленного на

⁸ 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.

⁹ 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.

¹⁰ 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.

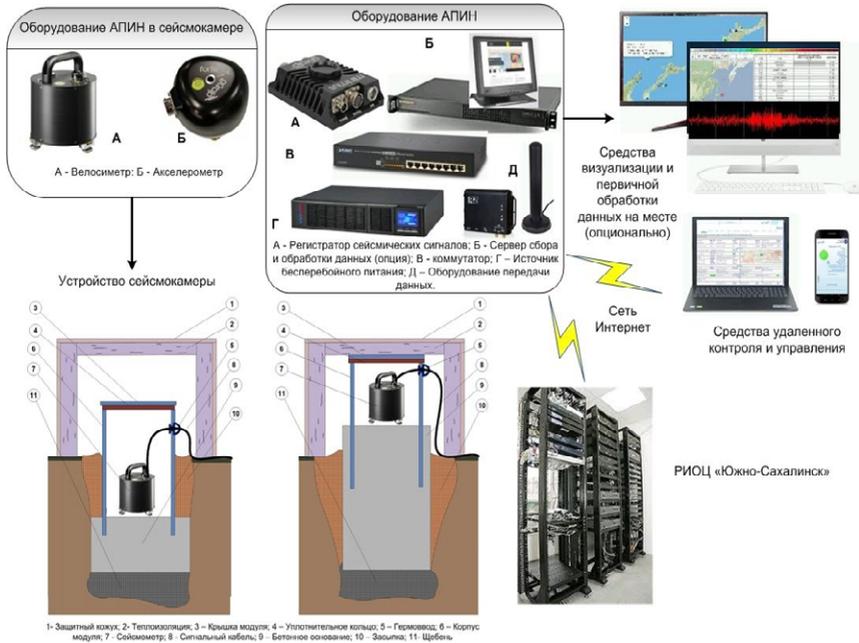


Рисунок 5 - Структурная схема Автономных Пунктов Инструментальных Наблюдений (АПИИ) СФ ФИЦ ЕГС РАН.

рисунок 5 оборудования¹¹ и станций в составе комплексных геофизических полигонов^{12,13}.

В п.4.1 главы 4 показаны этапы создания локальной сети сейсмического мониторинга района СУР и дано описание аппаратного и программного обеспечения.

В п.4.2 отражена последовательность развертывания локальной сети из 4-х станций. Составление планов по установке сети было начато в процессе проведения макросейсмических наблюдений в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения 2020 года и продолжено в феврале 2021 г. во время проведения рекогносцировочных работ, включающих в себя оцен-

¹¹ 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.

¹² 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).

¹³ 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.

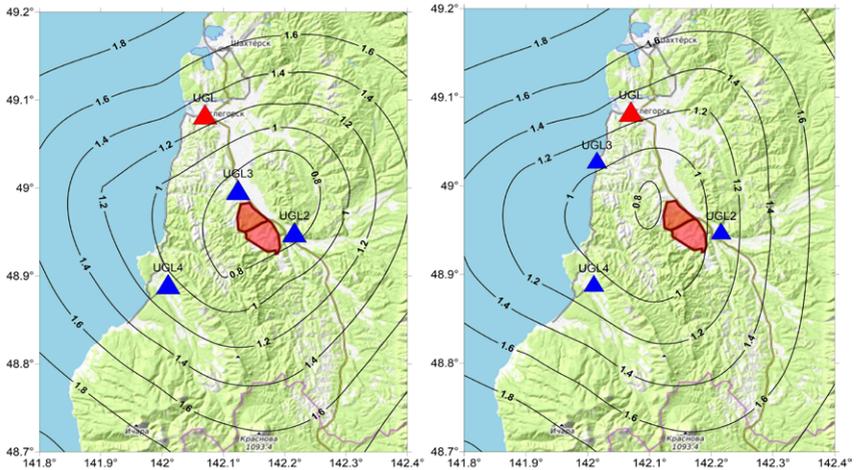


Рисунок 6 — Планируемые места расположения сейсмических станций (синие треугольники) вокруг СУР (красный полигон). Изолиниями показаны расчетные регистрационные возможности планируемой (слева) и созданной (справа) сети.

ку пригодности запланированных мест с учетом известных критериев и выполнение работ по измерению уровня сейсмического шума на местах установки. При реализации проекта на практике, положение станций изменено, с учётом имеющихся возможностей по установке оборудования. Планируемая и реализованные сети мониторинга представлены на рисунке 6, на котором изолиниями показаны результаты проведенной оценки регистрационных возможностей сети в районе Солнцевского угольного разреза и прилегающей территории с учетом локальных особенностей затухания волн и уровня сейсмических шумов на станциях. Для расчетов использовалось уравнение макросейсмического поля для о. Сахалин, а также шумовая обстановка на каждой станции сети, измеренная опытным путем.

Полученная сеть из 4-х станций, достаточно равномерно расположенных относительно СУР, практически соответствует основным требованиям, предъявляемым к сетям подобного типа. 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.

Параллельно был проведён выбор оборудования и его адаптация к существующей системе сбора сейсмологических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН. Немаловажным фактором для выбора являлся имеющийся опыт использования такого оборудования в локальных сетях мониторинга объектов добывающей промышленности и его эксплуатации в климатических услови-

Наименование станции	«Утлгорск»			«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 MegaFon R100-1	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 7 – Полный перечень используемого оборудования и данные о станциях локальной сети мониторинга СУР

ях, схожих с сахалинскими. 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. Полный перечень оборудования и даты его ввода в эксплуатацию представлены в таблице на рисунке 7.

Всё оборудование станций UGL2 – UGL4 было установлено с соблюдением концепции оснащения АПИИ, изложенной выше. Сейсмометры были установлены на грунт, с использованием заглубленного постаменты, а регистратор сейсмических сигналов и сопутствующее оборудование (источник бесперебойного питания и средства передачи данных) размещены в телекоммуникационном ящике в предоставленных помещениях.

Для станций UGL2 и UGL3 летом 2021 года был проведен анализ уровня спектральной плотности мощности сейсмического шума 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 представлены на рисунке 8.

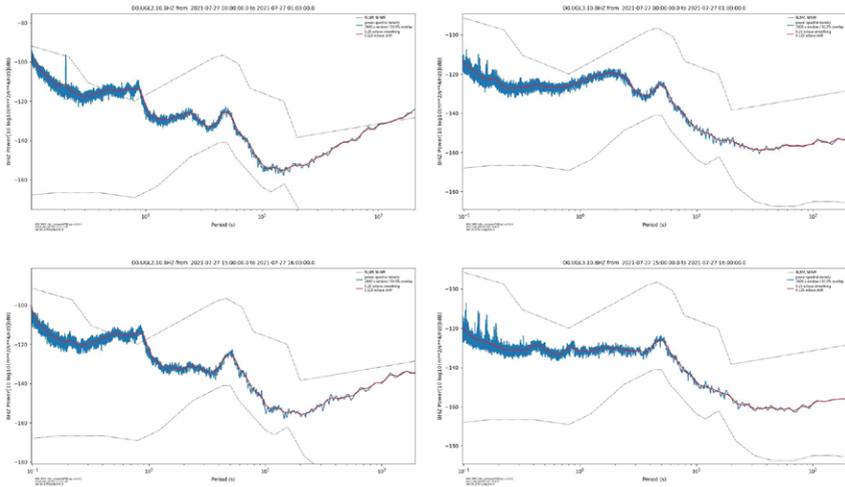


Рисунок 8 — Спектральная плотность мощности сейсмического шума станции UGL2 (слева) и UGL3 (справа) в дневное (верхние графики) и ночное (внизу) время.

Оценка уровня шумов проведена относительно моделей Петерсона (моделей низкого NLNM и высокого NNNM уровней шума), являющихся эталонами для оценки уровня сейсмического шума в окрестностях функционирования сейсмической станции. В целом, полученные данные показывают, что размещение сейсмических станций на выбранных площадках приемлемо, поскольку уровень шумов находится практически в пределах допустимых значений, что не должно вызвать значительных затруднений при обработке записей, особенно при использовании фильтрации сигнала.

На рисунке 9 показана общая схема созданной сети и организация направления потоков обмена данными по сети Интернет.

Согласно схеме, регистраторы UGL1-UGL3, предоставляют данные в режиме реального времени, обработка которых производится в оперативном режиме (при возникновении сейсмических событий) силами дежурной смены РИОЦ «Южно-Сахалинск», а данные этих станций, дополненные материалами станции UGL4, работающей в режиме доступа к данным по запросу, формируют архив записей волновых форм на серверах СФ ФИЦ ЕГС РАН, который используется для детализации и уточнения получаемых результатов. Обработка данных производится в программном комплексе DIMAS.

В п.4.3 представлены результаты, полученные в 2021-2023 годах с использованием данных локальной сети сейсмического мониторинга района СУР по четырем направлениям.

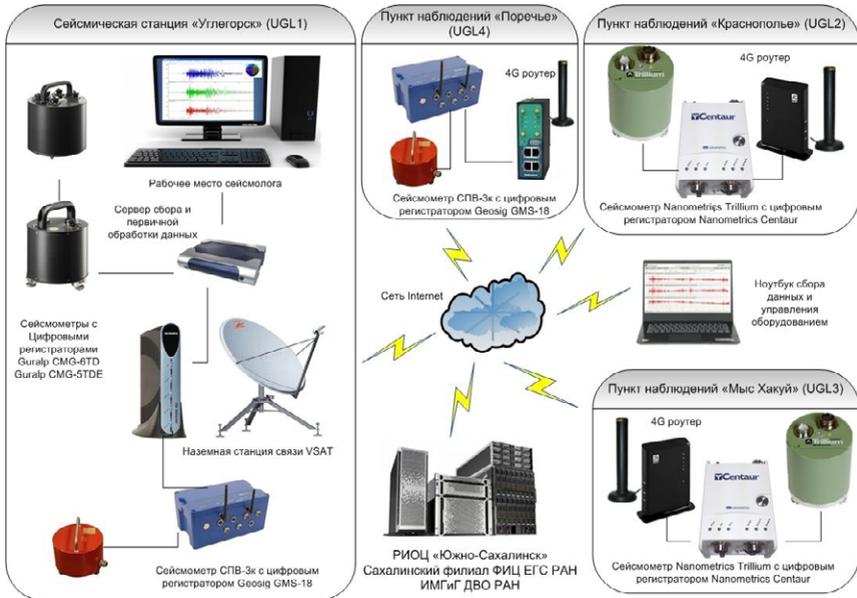


Рисунок 9 — Общая схема оборудования системы мониторинга СУР и потоков данных.

В п.4.3.1 приведен анализ данных зарегистрированных промышленных взрывов и землетрясений в районе СУР. Создан каталог сейсмических событий в районе Солнцевского угольного разреза в период с 22 апреля 2021 по 31 декабря 2022 гг., включающий как землетрясения, так и промышленные взрывы, производимые на Солнцевском угольном разрезе. Общее количество обработанных событий — 408, из них — 330 промышленные взрывы и 78 — землетрясения (диапазон магнитуд M_L от 0.2 до 5.0). На рисунке 10 показано положение эпицентров землетрясений в радиусе 30 км от месторасположения карьера СУР.

Слабая сейсмичность района в первые 4 месяца 2021 года (синие круги) может быть связана 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.

Ввод в эксплуатацию локальной сети также позволил решить проблему определения эпицентров промышленных взрывов, производимых на СУР. На рисунке 11 показаны эпицентры промышленных взрывов, определенные в 2020-2022 гг. Для 2020 года (левая часть рисунка) потребовалось добавить дополнительную врезку с радиусом 30 км от карьера, где произ-

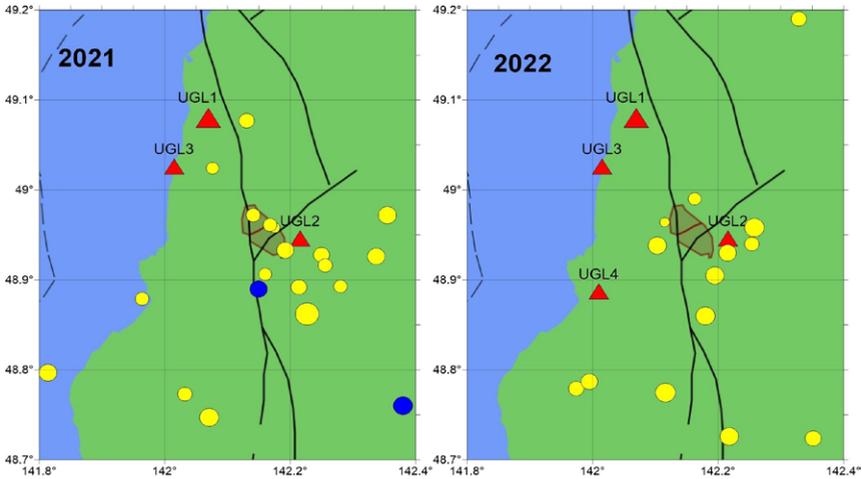


Рисунок 10 - Эпицентры землетрясений (расстояние до 30 км от района СВП), определенные по данным локальной сети (жёлтые круги) в 2021 г. (с 22.04.21 г.) и 2022 г. Синие круги — эпицентры землетрясений в период 01.01.2021 – 22.04.2021 гг. по данным региональной сети СФ ФИЦ ЕГС РАН.

водятся взрывы, так как при определении эпицентров взрывов 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. Полученные по данным локальной сети станции результаты 2021-2022 гг. систематизированы и представлены в репозитории Международного Сейсмологического Центра (ISC)¹⁴.

Представленные результаты подтвердили рассчитанные ранее теоретические регистрационные возможности созданной локальной сети.

В п.4.3.2 описано совместное использование данных региональных сетей ФИЦ ЕГС РАН и локальной сети. Показано¹⁵, 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 объ-

¹⁴ 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.

¹⁵ 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.

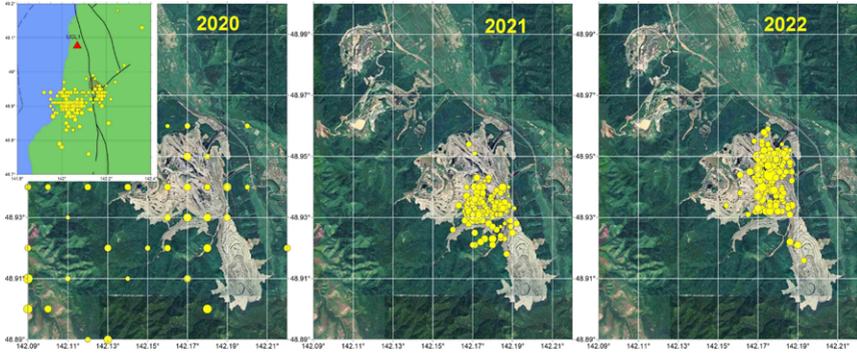


Рисунок 11 - Эпицентры промышленных взрывов на карьере СУР в 2020-2022 гг. (для 2020 г. добавлена врезка с расстоянием до 30 км от района карьера), определенные по данным локальной сети (жёлтые круги) в 2021 г. (с 22.04.21 г.) и 2022 г.

екты инфраструктуры района мониторинга. С конца мая 2021 по ноябрь того же года на территории Хабаровского края была развернута временная сеть станций Центрального Отделения ФИЦ ЕГС РАН, которая, в сочетании с региональной сетью на Сахалине и локальной сетью мониторинга СУР, позволила существенно скорректировать субмеридиональное расположение станций на острове Сахалин для более точного определения эпицентров землетрясений в исследуемом районе (рисунок 12).

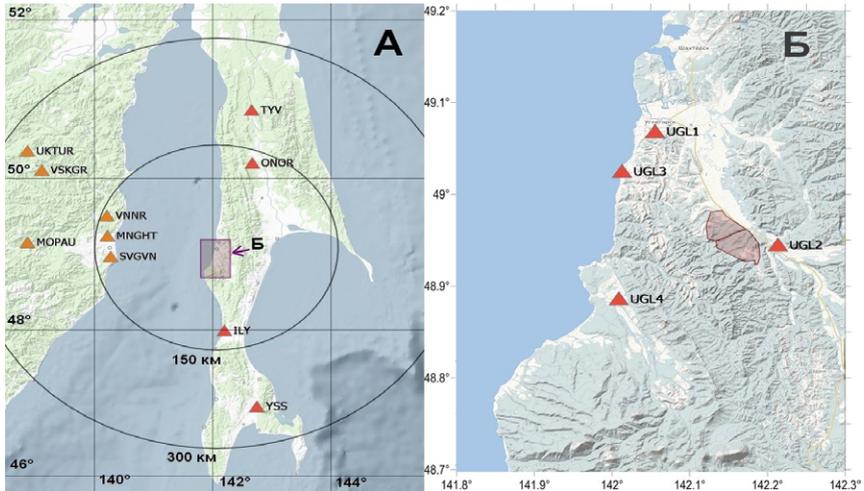


Рисунок 12 - Сейсмические станции региональной сети (А) и территория мониторинга сейсмическими станциями локальной сети (Б).

Используя записи волновых форм, полученных локальной сетью мониторинга СУР в период с 22 апреля 2021 по 30 ноября 2021 гг. и с использованием волновых форм указанных выше станций региональной сети были определены механизмы очагов ряда землетрясений (рисунок 13), 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 с типичными для неё типами сейсмодислокаций (два сброса и один взброс), что, 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, что соответствует механизмам землетрясения 13 сентября 2020 г. и его

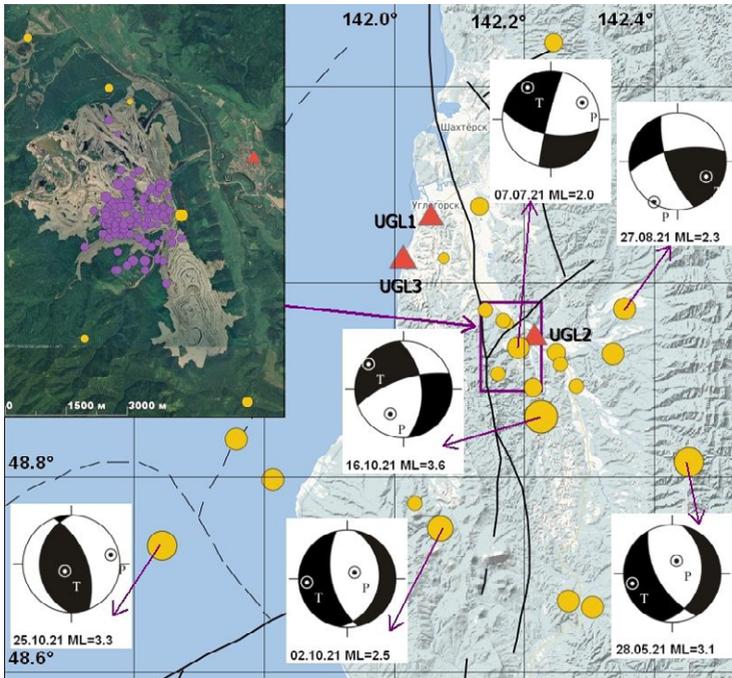


Рисунок 13 - Положение эпицентров событий, зарегистрированных с 22.04.2021 по 30.11.2021 гг. На врезке территория Солнцевского угольного разреза. Желтые круги — землетрясения (магнитуда M_L от 0.5 до 3.6), фиолетовые круги — промышленные взрывы (магнитуда M_L от 0.4 до 1.7). Геологические структуры (разломы) нанесены на карту согласно [Петров и др., 2016].

крупнейшего афтершока ($M_L=4.5$). Как видно из рисунка, все эти сейсмические события расположены непосредственно в районе Солнцевского угольного разреза, что может говорить об изменении характера сейсмичности от естественной к смешанной природно-техногенной.

В п.4.3.3 показано 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 сейсмометрами сети получены записи крупного оползня вскрышной породы на отвалах СУР 10.07.2021 г.¹⁶

Использование локальной сети для контроля сейсмического воздействия промышленных взрывов изложено в п.4.3.4. 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. Графики зависимости магнитуд от величины зарядов представлены на рисунке 14.

Поскольку на рисунке 14 представлены зависимости взрывов происходящих на одном и том же карьере, с одинаковыми технологиями при

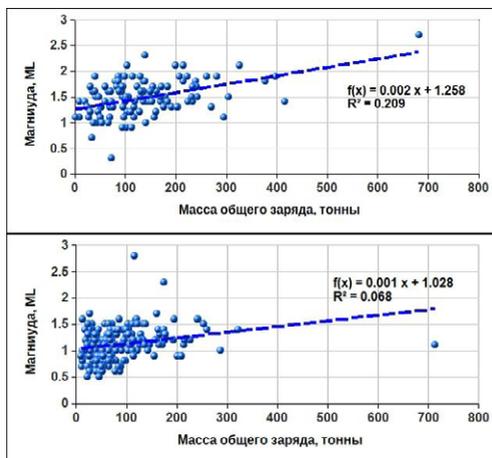


Рисунок 14 - Зависимость локальной магнитуды от общей массы заряда короткозамедленного взрыва на СУР в период 01.01.2020 — 21.04.2021 гг. (сверху) и после установки локальной сети в период 22.04.2021 — 31.10.2022 гг. (снизу).

¹⁶ Kostylev D.V., Boginskaya N.V. The first results of the seismic monitoring system of the Soltsevsky open pit coal mine area (on Sakhalin Island) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – P. 012002.

производстве взрывных работ, то отличия в распределениях, скорее всего, объясняются именно качеством определения магнитуды. На верхней части рисунка 14 определение магнитуды проводилось по одной станции (UGL1) и этим, очевидно, объясняется большая дисперсия точек. На нижней части рисунка 14, 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.

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования eLibrary Science index:

1. Ichyanagi 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)
2. **Kostylev, D.V.**, Boginskaya, N.V. & Zakupin, A.S. Seismic Activity in the Focus of the Uglegorsk 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)
3. **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)

Научные статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ:

4. 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%).
5. 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%).
6. Каменев П.А., **Костылев Д.В.**, Богинская Н.В., Закупин А.С. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекс-

- са 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%).
7. 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/gtr.2020.4.2.146-159. (ИФ РИНЦ; 0,806. 1.75 п.л., авторский вклад 30%).
 8. 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/gtr.2020.4.4.474-485. (ИФ РИНЦ; 0,806. 1.5 п.л., авторский вклад 50%).
 9. **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%).
 10. 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%).

Иные публикации:

11. **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).
12. **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).
13. 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/PCCATG12.

Костылев Дмитрий Викторович

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 24.09.2024
Уч.-изд. л. 1,1. Усл. печ. л. 1,18. Зак. 8053. Тираж 100 экз.

Отпечатано в
Участок офсетной и оперативной полиграфии
ИМГиГ ДВО РАН
693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки 1Б