Федеральное агентство научных организаций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОМПЛЕКСНОГО ИЗУЧЕНИЯ АРКТИКИ ИМЕНИ АКАДЕМИКА Н.П. ЛАВЕРОВА

На правах рукописи

Armoref

Антоновская Галина Николаевна

СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ТЕРРИТОРИЙ ИХ РАЗМЕЩЕНИЯ, ВКЛЮЧАЯ КРАЙНИЙ СЕВЕР

Специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

д-р физ.-мат. наук Н.К. Капустян

Архангельск 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 Проблемы сейсмического мониторинга при обеспечении сейсмобезопасности	
объектов	13
1.1. Современное состояние и задачи систем сейсмического мониторинга	13
1.2 Классификация систем сейсмического мониторинга	23
1.2.1 Сейсмологические наблюдения	23
1.2.2 Инженерно-сейсмический мониторинг	25
1.2.3 Вибрационная диагностика	33
1.3 Общие требования к системе сейсмического мониторинга	34
1.4 Методическая документация и требования к квалификации специалистов.	40
2 Аппаратурно-методическое оснащение системы сейсмического мониторинга	43
2.1 Анализируемые параметры сигналов и сейсмическая аппаратура	43
2.2.1 Технико-методические приемы по установке сейсмических станций в	
условиях Крайнего Севера	62
2.3 Технико-методические приемы построения комплексной системы сейсмич	еского
мониторинга	76
2.3.1 Сейсмологические наблюдения района размещения плотины	77
2.3.2 Сейсмометрические наблюдения на плотине	78
2.3.3 Виброконтроль работы гидроагрегата	79
2.3.4 Система мониторинга нового поколения	80
2.3.5 Обзор пространственно-временных систем наблюдения: схем расстано	вки
датчиков и периодичность снятия показаний	88
3 Сейсмический мониторинг Западного арктического сектора РФ	96
3.1 Развитие сейсмических наблюдений на Европейском Севере	96
3.2 Архангельская сейсмическая сеть	103
3.2.1 Телесейсмический мониторинг в структуре ФИЦ ЕГС РАН	103
3.2.2 Региональный мониторинг	104
3.2.3 Уточнение строения литосферы Западного арктического сектора РФ	117
3.2.4 Улучшение локации сейсмических событий Западного арктического се	жтора
РФ	123
3.3 Связь сейсмичности, аномалий теплового потока с геотектоникой	
Баренцевоморского региона. Сейсмотектоническое структурирование	130
3.4 Развитие сети сейсмического мониторинга в арктическом регионе	137
4 Сейсмический мониторинг состояния плотин ГЭС и гидроагрегатов	141
4.1 Сводка основных опасных природных явлений и техногенных процессов	141
4.2 Контроль гидротехнических сооружений. Нормативные документы	143
4.3 Контроль работы гидроагрегатов. Нормативные документы	146
4.4 Методы мониторинга гидротехнических сооружений	151
4.4.1 Возможности использования слабых землетрясений	151
4.4.2 Наблюдения собственных колебаний плотины и верификация матмоде	ли 159
4.4.3 Экспресс-оценка состояния плотины с использованием вибраций от	. –
автотранспорта	171

4.5 Методы мониторинга гидроагрегатов	
4.5.1 Математическое моделирование состояния гидроагрегатов	
4.5.2 Натурные наблюдения опасных процессов в гидроагрегатах	
4.5.3 Анализ проявлений отклонений от штатной работы агрегатов	
4.6 Использование механических вибраций, создаваемых при работе ГЭС,	для оценки
состояния плотин	
4.7 Комплексирование сейсмических методов для обследования плотин и р	районов их
размещения	
4.7.1 Сейсмическая аппаратура и схема наблюдений	
4.7.2 Методики обследования	
4.7.3 Анализ результатов исследований	
5 Сейсмические способы обследования антропогенных объектов различного	
назначения	
5.1 Обследование состояния газокомпрессорной установки	
5.2 Верификация расчетной модели. Оценка сейсмических воздействий	
5.2.1 Оценка добавочных деформаций при выполнении свайных полей в	близи
исторических зданий	
5.2.2 Оценка сейсмических воздействий на храм	
5.3 Оценка уровня вибраций, создаваемых железнодорожным транспортом	í 225
5.3.1 Воздействие вибраций от железнодорожного транспорта	
5.3.2 Сопоставление расчетных данных и натурных наблюдений	
5.4 Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при	
проектировании	
5.4.1 Мониторинг состояния конструкций	
5.5 Экспресс-метод обследования жилых зданий в зоне разрушительных	
землетрясений	
6 Перспективы развития систем сейсмического мониторинга на Крайнем Сев	sepe 253
6.1 Сейсмический мониторинг Северного морского пути	
6.2 Сейсмический мониторинг линий железнодорожных магистрали	
6.3 Исследование на натурных моделях геологических сред	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	
Приложение А Параметры воздействий природной и техногенной сейсмично	сти на
сооружения платформенных территорий	

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Термины и	Определения		
сокращения			
apx.			
ACC	Архангельская сеисмическая сеть		
ACCK	Автоматизированная система сейсмометрического контроля		
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь		
ЫΨ	Быстрое преобразование Фурье		
BEII	Восточно-Европейская платформа		
BCII	Вертикальное сейсмическое профилирование		
ВЧР	Верхняя часть разреза		
ГА	Гидроагрегаты		
ГТС	Гидротехнические сооружения		
ГАЭС	Гидроаккумулирующая электростанция		
ЗФИ	Земля Франца-Иосифа		
ИФЗ РАН	Институт физики земли имени О.Ю. Шмидта РАН		
КИА	Контрольно-измерительная аппаратура		
КоФ ФИЦ	Кольский филиал Федерального государственного бюджетного		
ЕГС РАН	учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая		
ПСС	геофизическая служоа РАН»		
	Локальная сеисмологическая сеть		
НДС	Напряженно-деформированное состояние		
HICC	Научно-техническое сопровождение сооружения		
	Программное обеспечение		
ШЭ	Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Фелерации		
РЖЛ	Российские железные дороги		
РК	Рабочее колесо		
ΡΟΓΔ	Ралиально-осевой гипроагрегат		
СМП	гадиально-осевои гидроагрегат		
COX	Северный морской путь		
	Срединно-океанический хребет		
	Сеисмическая станция		
	Саяно-шушенская ГЭС имени П.С. непорожнего		
	Северный широтный ход		
УВЬ ФГГУЦІ	уровень верхнего обефа		
ФІБУН	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки		
ФИЦКИА	Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики		
	им. акад. п.11. Лаверова ГАП		
ICOLD	комиссия по большим плотицам		
DII	OT AUDIT phase locked loop thereased water and the second		
DDC	От англ. рназе-юскей юор – фазовая подстроика частоты		
	Or allow Universal coordinated time value of a week week week week week week week we		
	время		

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Мы живем в изменяющемся мире, трансформируется среда обитания людей, появляются новые идеи, технологии и материалы, нововведения коснулись практически всех сфер. Весьма наглядно технический прогресс проявляется в строительстве – сооружения становятся всё более сложными и возводятся практически в любых инженерно-геологических условиях. Но неоспоримые достоинства технического прогресса сопровождаются и недостатками, один из которых – повышение опасности жизнедеятельности. Причинами разрушений антропогенных объектов и оборудования, с одной стороны, являются природные катастрофы, с другой – техногенные аварии, связанные со сложностью современных систем, повышенными нагрузками, ошибками в проектировании и при строительстве, и, так называемый, человеческий фактор.

Оптимальным и уже признанным на практике вариантом решения, позволяющим уменьшить количество аварийных ситуаций, является создание систем инструментального мониторинга объектов. Диссертация является обобщением опыта создания систем сейсмического мониторинга различного назначения и их комплексирования, рассмотрен круг аппаратурных и методических вопросов. Среди огромного количества публикаций и нормативных документов отметим наиболее близкие к нашим исследованиям и содержащие ключевые илеи (База Международных нормативных документов мониторинга больших плотин ICOLD; ГОСТ Р 22.1.12 – 2005; МРДС 02-08; Довгань, 2006; Еманов, Селезнев, Бах и др., 2002; Капустян, 2012; Патент 2515130 (Воробьева, Золотухин, 2014); Короленко, 2014; Antonovskaya et al., 2017; RECONASS..., 2017 и др.). Сейсмический мониторинг – постоянно развивающееся направление, захватывающее все большие сферы его применения. При этом привлекаются новые аппаратурно-методические разработки, что часто меняет идеологию построения систем (Antonovskaya et al., 2017; *Рогожин и др., 2016)* и вскрывает ряд непроработанных вопросов особенно при внедрении.

Созданные во второй половине XX в. технические решения мониторинга, как правило, индивидуальные для отдельных сооружений (например, здание МГУ) или узкого круга объектов (например, высотные плотины I и II классов), неизбежно физически и морально стареют. Кроме того, анализ причин возникновения чрезвычайной ситуации в ряде случаев носит предположительный характер, не исчерпывает весь круг опасностей, т.к. многие процессы изучены недостаточно полно (Лобановский, 2009). При этом, чем более разнообразен круг промышленной деятельности и чем более хрупкая природная экосистема, количество сочетаний воздействий и опасных процессов растет. Это в полной мере относится к территориям Крайнего Севера. Из-за сложных климатических условий,

труднодоступности районов, отсутствия необходимой инфраструктуры и пр. арктические территории в настоящее время исследованы фрагментарно, вплоть до того, что даже сейсмическое районирование разномасштабно, есть «белые пятна», особенно для шельфа и арктических островов (СП 14.13330.2014).

В настоящее время именно Северный Ледовитый океан по-прежнему остается исключительно важным районом для понимания как региональной геологии (Van Wagoner et al., 1986; Ryberg et al., 1995; Егоркин, 2000; Ramesh et al., 2002; Bepбa, 2007; Roslov et al., 2009; Malyshev, et al., 2012; Рогожин и др., 2016; Evangelatos, Mosher, 2016 и многие др.) и разведки месторождений (Добрецов, Конторович, 2013; Каминский и др., 2012 и многие др.), так и глобальных представлений, касающихся формирования Земли в целом (Sokolov et al., 2002; Gaina et al., 2009; 2011; Артюшков, 2010; Лаверов и др., 2013; Кулаков и др., 2013; Lebedev et al., 2017 и многие др.). Данные о слабой сейсмичности Западного арктического сектора РФ, выявленные в последнее десятилетие, изменили представления о геодинамике этого региона и указывают на необходимость углубленного исследования природы и особенностей проявления региональной сейсмичности (Юдахин и др., 2003; Маловичко и др., 2014; Antonovskaya et al., 2015; Рогожин и др., 2016 и др.). Одним из путей решения является развитие систем стационарных сейсмических наблюдений, т.е. мониторинга с использованием сейсмологических знаний.

Таким образом, в современном мире понятие «сейсмический мониторинг» фактически требует максимального охвата проблемы – от исследования территории размещения объекта до состояния его конструкций и контроля работы оборудования. Задача, с одной стороны, сложная и многодисциплинарная, а, с другой стороны, упрощается тем, что работы, в том числе и на территориях Крайнего Севера, начинаются практически с «чистого листа», т.е. без подстройки к имеющимся, но устаревшим решениям.

Существенно, что для развития новых подходов необходимо выполнение крупного обобщения представлений и методик, сопровождаемого анализом и пересмотром нормативных требований к мониторингу антропогенных объектов и территорий их размещения. Важной основой создаваемых решений является современная приборная база, вычислительные и информационно-коммуникационные возможности, привлечение научных знаний из разных отраслей, а также комплексный многодисциплинарный подход к мониторингу. Именно на восполнение данного пробела в существующей ситуации в сфере сейсмического мониторинга нацелена данная диссертационная работа.

Объект исследования: природные и техногенные сейсмические сигналы, создаваемые собственными и вынужденными колебаниями антропогенных объектов (сооружениями и

оборудованием), грунты основания фундаментов, верхняя часть земной коры, разрывные нарушения, организация сейсмических наблюдений, сейсмичность Западного арктического сектора РФ.

Цель: Разработка методических основ и практических рекомендаций по оценке состояния антропогенных объектов и территорий их размещения на основе сейсмических наблюдений.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Систематизировать сведения о сигналах, используемых при сейсмическом мониторинге, и провести анализ возможностей регистрирующей аппаратуры, сформировать требования к сейсмическим датчикам и способам передачи данных, провести опробование эффективных решений.

 Расширить географию сейсмического мониторинга Западного арктического сектора РФ с обеспечением наблюдений восточнее 30° в.д. с повышением чувствительности по магнитуде не ниже 3.5 для всего региона.

3. Уточнить карту сейсмичности Западного арктического сектора РФ и выявить зоны природно-техногенных опасностей.

4. Разработать методику оценки состояния уникальных сооружений при предполагаемых сейсмических воздействиях.

5. Разработать набор сейсмических способов оперативного обследования и мониторинга состояния конструкций, грунтов основания и площадок размещения антропогенных объектов различного назначения при высоком уровне промышленных шумов.

6. Разработать методические основы сейсмического мониторинга возникновения недопустимой вибрации гидроагрегата ГЭС вследствие гидродинамических пульсаций.

Обоснованность результатов – определяется использованием калиброванной аппаратуры, подтверждается статистическим анализом, повторяемостью результатов, согласованностью с данными других методик и с инженерными расчетами.

Научная новизна и практическая значимость работы

1. Мониторинг слабой сейсмичности Западного арктического сектора РФ по данным Архангельской сейсмической сети показывает наличие сейсмических событий в местах расположения особо ответственных природно-технических объектов, в том числе в районе захоронения радиоактивных отходов на морском дне и в районе Севморпути.

2. Выявлена сейсмическая активность на склоне континентального арктического шельфа (между арх. Шпицберген и арх. Земля Франца-Иосифа), что является одним из индикаторов картирования границы России в Арктике, а также подтверждает

деструктивные процессы на шельфе. Кроме того, единичные землетрясения в зонах депрессий указывают на новейшую тектоническую активность, ассоциируемую с высокоскоростными неоднородностями в земной коре.

3. Получены новые знания о сейсмичности Западного арктического сектора РФ. Это позволило провести сейсмотектоническое структурирование территории, весьма актуальное для сейсморайонирования и, тем самым, обеспечения безопасности при проектировании и строительстве ответственных объектов.

4. Впервые обобщен опыт инструментального мониторинга конструкций уникальных сооружений различного назначения с использованием сейсмических методов. На экспериментальных примерах показаны новые возможности, позволяющие уже на стадии проектирования прогнозировать особенности поведение конструкции после ее возведения. Приведенные материалы могут быть использованы на практике для оценки воздействий, а также стать основой научно-исследовательских разработок по выявлению основных законов изменения в работе конструкций (ползучесть железобетона, вклад температурных изменений и пр.).

5. Разработаны сейсмические способы обследования сооружений, в том числе при высоком уровне промышленных шумов. Это важно на начальном этапе мониторинга (стадия проведения обследований), т.к. позволяет оперативно получать интегральное представление о состоянии объекта и является ключевым для понимания природы процессов деформирования тела сооружения. Для более детальных исследований предпочтительны активные сейсмические методы с применением источника и схемы наблюдений, нацеленные на изучении выделенного аномального участка тела сооружения и геологической среды.

6. Разработана методика сейсмической диагностики состояния сооружений и грунтов оснований с использованием сигналов, создаваемых мощным электрооборудованием.

7. Показана возможность контроля работы гидроагрегатов ГЭС путем регистрации сейсмических сигналов в удаленной от агрегатов точке.

Практическая значимость работы

По результатам работ Архангельской региональной сейсмической сети в 2013 г. был присужден международный сейсмологический код АН, т.е. сеть получила международное признание. В 2014 г. сеть была зарегистрирована в качестве уникальной научной установки (УНУ) на официальном сайте «Современная исследовательская инфраструктура Российской Федерации» http://www.ckp-rf.ru/usu. Результаты ориентированы на текущий Европейского сектора Арктики, обстановки мониторинг сейсмической защиту национальных интересов при освоении Арктики, прогноз возникновения

катастрофических, в первую очередь сейсмических и инициируемых ими природных явлений (оползни, обвалы и пр.).

Разработанные системы сейсмического мониторинга успешно функционируют на ряде высотных зданий г. Москвы (ул. Давыдковская, ул. Дыбенко, ул. Маршала-Жукова), на Чиркейской ГЭС (ЧГЭС, Республика Дагестан). Система ЧГЭС принята в промышленную эксплуатацию в 2015 г., отмечена дипломом и золотой медалью на 13-ом Московском Международном форуме и выставке «Точные измерения – основа качества и безопасности. MetrolExpo'2017». Разработанные методические приемы были применены на международном уровне при обследовании плотины Song Tranh-2, Вьетнам, где была выявлена причина нарушений целостности плотины.

Проведенные сейсмические исследования системы гидротурбина-водовод приплотинных ГЭС открывают новые перспективы обеспечения дистанционного контроля безопасности гидротехнических сооружений путем комплексирования систем вибрационного контроля гидротурбины и сейсмомониторинга плотины с использованием сейсмического оборудования нового поколения. Это позволяет повысить надежность мониторинга состояния и работы гидротурбин при использовании независимых систем наблюдения (сейсмомониторинга и виброконтроля), что существенно для понимания физики процессов. Результаты требуют доработки путем проведения масштабных натурных наблюдений.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Сейсмотектоническое структурирование территории Западного арктического сектора РФ, полученное на основе анализа пространственного распределения сейсмических событий и сопоставления с основными геологическими структурами Баренцевоморского региона, позволяющее указать зоны современной геодинамической активности и уточнить параметры сейсмических воздействий для платформенных территорий.

2. Система сейсмического мониторинга нового поколения, объединяющая наблюдения за состоянием антропогенных объектов, опасными процессами на территориях их размещения, а также позволяющая дополнительно вести вибромониторинг работающего промышленного оборудования, основанная на использовании унифицированной современной сейсмической аппаратуры, способах сбора и обработки данных.

3. Методика, основанная на использовании тестовых слабых сейсмических воздействий, объединяющая наблюдения вибраций разной природы и компьютерное моделирование реакции сооружения, позволяющая оценить состояние конструкций

уникальных сооружений, в том числе при предполагаемых сильных сейсмических воздействиях.

4. Комплекс сейсмических способов оперативного обследования и мониторинга, позволяющий для антропогенных объектов различного назначения определять состояние конструкций и грунтов основания при высоком уровне промышленных шумов.

5. Методические основы контроля возникновения недопустимых вибраций гидроагрегатов ГЭС вследствие гидродинамических пульсаций, позволяющие судить о наступлении опасной ситуации из удаленной от агрегата точки системы мониторинга нового поколения на основании спектрально-временного анализа сейсмического сигнала.

Связь работы с научными программами.

В диссертационную работу включены результаты исследований и разработок, выполненных при поддержке: программы НИР № АААА-А16-116052710111-2 (Р), проектов РФФИ 14-05-98801 (Р), 10-05-00497 (Р), 11-05-98800 (Р), в т.ч. международного 14-05-93080 (Р), программы Президиума РАН № 12-П-5-1009 (И), программ УрО РАН 12-У-5-1006 (Р), 15-10-5-7 (И); грантов Президента РФ МК-2337.2009.8 (Р), МК-4070.2011.8 (Р), ФЦП на 2009-2013 гг.: госконтракт № 14.740.11.0195 (Р), соглашение № 8331 (Р) и пр.

Личный вклад автора присутствует на всех этапах выполнения работы. Автором сформулированы цели и задачи работы, разработаны и реализованы методики экспериментальные исследований, выполнены основные наблюдения на всех антропогенных объектах, представленных в работе, принято участие в разработке специализированной сейсмической аппаратуры, проведена обработка и анализ данных, представлено обоснование механизмов наблюдаемых явлений. Под руководством и автора в течение 2010-2016 гг. личном участии были открыты следующие сейсмологические пункты в Западном арктическом секторе РФ: самые северные сейсмологические пункты России - «Земля Франца-Иосифа» и «Омега» на о. Земля Александры арх. Земля Франца-Иосифа; «Северная Земля» на арх. Северная Земля, «Нарьян-Мар» в г. Нарьян-Мар НАО; «Амдерма» в п. Амдерма НАО; «Андозеро», Онежский р-н.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и 1 приложения. Объем работы 317 страниц машинописного текста, включая 151 рисунок, 32 таблицы. Список литературы содержит 493 источника.

Апробация результатов работы и публикации. Сейсмические подходы и схемы апробированы на ряде уникальных объектов России: высотных зданиях и площадках их размещения (г. Москва), плотинах ГЭС (каскад Сулацких ГЭС, Республика Дагестан;

плотина Song Tranh-2, Вьетнам), газокомпрессорных установках (Восточное Таркосалинское месторождение, ЯНАО), историко-архитектурном комплексе Соловецкого кремля (Архангельская обл.), Спасо-Прилуцкого монастыря (г. Вологда) и пр.

Результаты, полученные на различных этапах исследований, были представлены автором лично на международных и российских научных конференциях и симпозиумах, в том числе на: Евразийском форуме SEISMO-2017; Международной конференции по развитию исследований и сотрудничеству в области геофизики VIET-GEOPHYS-2017 (Ханой, Вьетнам, 2017); совещании Международной комиссии по большим плотинам ICOLD (Прага, Чехия, 2017); XLIX Тектоническом совещании (Москва, 2017); Американском геофизическом сообществе AGU (Сан-Франциско, Калифорния, США, 2016); Европейской конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмичности (Стамбул, Турция, 2014); Генеральных Ассамблеях ЕGU (Осло, Норвегия, 2008; Вена, Австрия 2011, 2016); Генеральной Ассамблеи ESC (Триест, Италия, 2016); Генеральной Ассамблеи IUGG (Прага, Чехия, 2015); Международной Ассамблеи IANS-IAPSO-IASPEI-2013 (Гётеборг, Швеция); Международной сейсмологической школе (Агверан, Армения, 2014); русско-норвежской конференции (Осло, Норвегия, 2014); Международном форуме высотного и уникального строительства 100+ (Екатеринбург, 2015); Национальных конгрессах «Комплексная безопасность в строительстве» (Москва, 2010, 2011); Всероссийской конференции «Геологические опасности» (Архангельск, 2009); Международном симпозиуме «Экология арктических и приарктических территорий» (Архангельск, 2010); Международной конференции «Актуальные вопросы мониторинга геологической среды и безопасности урбанизированных территорий» (Калининград, 2011) и др.

Основные результаты исследований по теме диссертационной работы изложены в 19 статьях в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК (из них – 7 статей в журналах, входящих в базу WoS и/или Scopus), 3 патентах (в соавторстве), 1 руководстве (в соавторстве), 4 монографиях (в соавторстве).

Благодарности. Автор выражает сердечную благодарность научному консультанту д.ф.-м.н. Н.К. Капустян за всестороннюю поддержку, ценные идеи и дискуссии. Искреннюю признательность за участие и советы автор выражает д.г.-м.н. Е.А. Рогожину (ИФЗ РАН), д.г.-м.н. М.Д. Хуторскому (ГИН РАН) и к.ф.-м.н. Е.О. Кременецкой (КоФ ФИЦ ЕГС РАН). За реализацию идей по разработке сейсмического регистратора автор признателен к.ф.-м.н. А.И. Мошкунову (ООО «Алекс-Лаб»). За помощь в создании расчетных моделей и инженерно-строительные консультации автор благодарит к.т.н. С.И. Дубинского (АО «ВНИИЖТ») и А.Н. Климова (АО «ЦНИИЭП жилища»).

Автор благодарит сотрудников – коллектив лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН за взаимопомощь, теплую и дружественную атмосферу, командный настрой и оптимизм на различных этапах исследований.

Автор благодарит администрацию Архангельской области, ПУ ФСБ России по Западному арктическому району, ПАО «Силовые машины», АО «ЦНИИЭП жилища», Национальный парк «Русская Арктика», компанию NORSAR (Норвегия), сотрудников IG VAST (Вьетнам), сотрудников ИФЗ РАН и лаборатории физики льда ФГБУ «ААНИИ», сотрудников ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева и каскада Сулакских ГЭС, сотрудников и братию Спасо-Преображенского Соловецкого, Спасо-Прилуцкого Димитриева и Сретенского монастырей, оказавших содействия на различных этапах выполнения исследований.

Автор хранит светлую память о чл.-корр. РАН, профессоре Феликсе Николаевиче Юдахине, который занимался становлением и развитием сейсмологии в Архангельской области и заложил основы Архангельской сейсмической сети.

1 Проблемы сейсмического мониторинга при обеспечении сейсмобезопасности объектов

1.1. Современное состояние и задачи систем сейсмического мониторинга

Сейсмический мониторинг, как и само понятие «мониторинг», стало неотъемлемой частью обеспечения безопасности производств и жизни людей. Система мониторинга – это комплекс устройств и способов наблюдения на интервале времени, анализа данных и принятия решений, связанных между собой и предоставляющих информацию о состоянии конкретного объекта (территория, сооружение, промышленная установка). Как правило, при мониторинге наблюдения проводятся непрерывно во времени или дискретно. При этом преимущественно инструментальными методами оцениваются отдельные параметры, характеризующие состояние объекта. Целью любого мониторинга является сбор сведений, позволяющих предупредить о подготовке чрезвычайной ситуации природного и техногенного характера, в том числе выявление опасных процессов на стадии их зарождения. В данной работе рассматривается мониторинг, проводимый на базе различных сейсмических датчиков для обеспечения безопасности сооружений и территорий их размещения, который будем называть сейсмическим мониторингом или сейсмомониторингом, кроме тех случаев, когда вид наблюдения имеет устоявшееся название, например, инженерно-сейсмометрический мониторинг конструкций.

Инструментальный сейсмический мониторинг как вид наблюдений имеет достаточно большую историю. Для природных объектов это, прежде всего сейсмологические наблюдения, началом которых считают первую половину XIX в. В России инструментальная сейсмология берет свое начало в 1900 г., когда при Российской Императорской Академии наук была образована Постоянная центральная сейсмическая комиссия под председательством О.А. Баклунда. В конце XIX в. впервые Дж. Милном и Р. Малле создаются каталоги землетрясений для всего мира *(International Handbook...,* 2002), в России первые каталоги были составлены И.В. Мушкетовым и А.П. Орловым *(Мушкетов, Орлов, 1893)*. Основное внимание уделялось геологической природе сейсмических явлений (К.И. Богданович, В.Н. Вебер, Д.И. Мушкетов, Ф. Монтессю де Баллор, А. Зиберг и многие другие), разработке сейсмометрической аппаратуры и созданию сейсмических станций (Б.Б. Голицын, А.В. Вихерт, П.М. Никифоров и др.) *(Рыков, 2017)*.

Систематические сейсмические наблюдения за состоянием сооружений ведутся более полувека, например, мониторинг конструкций Главного здания МГУ, плотин ГЭС и пр. (Корчинский, 1953; Николаев, 2005; ГОСТ Р 22.1.12–2005; Кузьменко и др., 2007;

Марченков и др., 2015). Представление о структуре системы сейсмомониторинга сооружений формировалось специфически – нормативы часто опережали обобщение опыта выполнения работ, что приводило как к корректировке норм, так и созданию избыточных или недостаточных по аппаратурному оснащению решений. Примером может служить не действующий сейчас МГСН 4.19-05, где, к примеру, сейсмометры требовалось устанавливать с шагом в 5 этажей (при этом даже не было указано, как считать этажи – по лестничным маршам или перекрытиям). Непонятно было также, что делать с получаемыми данными.

В 2005 г. был принят действующий сейчас (ГОСТ Р 22.1.12-2005), определяющий понятие структурированной системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС). Согласно нормативу, «СМИС – это построенная на базе система, программно-технических средств предназначенная для осуществления мониторинга технологических процессов и процессов обеспечения функционирования оборудования непосредственно на потенциально опасных объектах, в зданиях и сооружениях, и передачи информации об их состоянии по каналам связи в дежурнодиспетчерские службы этих объектов для последующей обработки с целью оценки, предупреждения и ликвидации последствий дестабилизирующих факторов в реальном времени, а также для передачи информации о прогнозе и факте возникновения чрезвычайных ситуаций, в том числе вызванных террористическими актами, в единую дежурную диспетчерскую службу». Инструментальный мониторинг конструкций входит в СМИС как блок СМИК (по документу – система мониторинга инженерных конструкций¹). Существенно, что ГОСТ Р 22.1.12–2005, пожалуй, впервые регламентирует системные связи между блоками наблюдений, анализа данных и принятия решений. В этом его отличие от прочих нормативов, которые требуют выполнения разных видов наблюдений, но не рассматривают связи между ними. Пример последнего – ПТЭ (РД 34.20.501-95), где прописана необходимость трех видов мониторинга без указания соотношения их результатов (подробнее см. ниже).

В России действует ряд федеральных и отраслевых нормативных документов, регламентирующие этапы проведения различного рода изысканий и мониторинга, нацеленных на безопасное функционирование сложных технических систем ($\Phi 3 N 2 384$ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», МРДС 02-08 «Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных», СНиП 2.01.15-90 «Инженерная

¹ В связи с неопределенностью термина «инженерные конструкции» в литературе СМИК расшифровывают с употреблением сочетания «изменений в конструкциях».

защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических проиессов. Основные положения проектирования»; ГОСТ Р 22.1.12–2005 «Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений»; ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Общие требования»; СТО 1.1.1.03.001.0868-2012 «Мониторинг сейсмологических условий районов размещения атомных станций»; НП-032-01 «Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности»; РБ-019-01 «Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно и радиационно-опасных объектов на основании геодинамических данных»; СТО 70238424.27.140.032-2009 «Гидроэлектростанции в зонах с высокой сейсмической активностью. Геодинамический мониторинг гидротехнических сооружений. Нормы и требования»; ФЗ 116 от 21.07.1997 (ред. с 1.07.2013) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и пр.). Существенно, что основные блоки были разработаны еще в 1970-80 гг. Сейчас происходит актуализация большинства нормативов, но, как правило, она не затрагивает физических основ применяемых методов, несмотря на прогресс, связанный с электроникой и цифровыми технологиями (боле подробно представлено в гл. 4 и 5). При этом количество ежегодных катастроф не уменьшается, а расследования аварий часто указывают на причины, которые не учтены в нормативах, или на явления, обнаружение развития которых не предусмотрены мониторингом состояния объекта. Современная ситуация показывает, что уникальные для того времени технические решения неизбежно стареют, их нельзя эксплуатировать бесконечно долго и без внедрения новейших научно-технических достижений.

С другой стороны, обновление лишь отдельных устройств в существующих системах мониторинга также принципиально не верно – необходимо менять саму концепцию сейсмического мониторинга, обновлять схемы наблюдений, налаживать связи между различными видами наблюдений и «обратную связь» с объектом. Как правило, системы мониторинга нацелены на решение конкретных достаточно узко направленных технических задач, например: непрерывный контроль шахтного поля или сооружения (плотина, высотное здание) при сейсмических воздействиях; мониторинг трубопроводов при сильных землетрясениях; для территории размещения ответственного объекта – оценка сейсмической балльности и т.д. Зачастую, в одном районе для решения подобных задач установлено несколько принципиально различных систем наблюдения для сейсмического мониторинга с конкретным типом датчиков (механические широкополосные или короткопериодные сейсмометры, пьезодатчики) с разными схемами сбора и хранения данных. В результате – затрачены большие средства, данных много, а

они не сопоставимы друг с другом, т.е. теряется важная информация, добываемая с большими материальными и трудовыми вложениями.

Примером является Республика Дагестан, где действует региональная сейсмологическая сеть Дагестанского филиала Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН (ДФ ФИЦ ЕГС РАН), дополнительно была создана ПАО «РусГидро»—«Дагестанский локальная сейсмологическая сеть филиал», охватывающая каскад Сулакских ГЭС (Магомедов и др., 2016), при этом отдельно на организованы сейсмологические и/или инженерно-сейсмометрические плотинах наблюдения (РД 34.20.501-95, ГОСТ Р 55260.1.5-2012) (рисунок 1.1). Инженерносейсмометрическая сеть обеспечивает получение оперативной информации о реакции сооружения на сейсмические воздействия, размещается в теле плотины и в прибортовых массивах, а сейсмологическая ведет наблюдения за сейсмическим режимом в зоне ложа водохранилища вблизи створа сооружений и на прилегающих территориях. Расположение определяется сейсмичностью района и возможностями размещения стационарных станций. При этом каждые 5 лет проводятся тестовые испытания по определению динамических характеристик плотин (собственных частот, форм колебаний сооружения, расчет декрементов затухания колебаний) с составлением динамических паспортов (ГОСТ Р 55260.1.5-2012).



1 – плотины ГЭС с системами инженерно-сейсмометрических наблюдений; 2 – автоматическая локальная сейсмологическая сеть каскада Сулакских ГЭС; 3 – сейсмические пункты автоматической локальной сети, совмещенные со станциями региональной сейсмологической сети ДФ ФИЦ ЕГС РАН; розовый круг – район, в котором осуществлена состыковка всех систем сейсмического мониторинга

Рисунок 1.1 – Системы сейсмического мониторинга Республики Дагестан

При этом виды наблюдений различаются требованиями к аппаратуре регистрации сигналов. При инженерно-сейсмометрическом мониторинге требуется регистрировать сильные воздействия интенсивностью от 5 баллов, при сейсмологическом – преимущественно низкочастотные (0.01–20 Гц), при оценке динамических характеристик – слабые низкочастотные колебания (0.1–20 Гц). Наблюдения ведутся различными типами датчиков и регистраторов; данные обрабатываются разными способами, при этом результаты, как правило, не сопоставляются.

Исключением является район плотины Чиркейской ГЭС (ЧГЭС), на которой установлена система сейсмологического мониторинга, объединяющая в себе все вышеуказанные виды наблюдений, а также частично вибрационный мониторинг (Гамзатов и др., 2014). На станции Дубки (розовый круг на рисунке 1.1) осуществлена состыковка системы мониторинга ЧГЭС с локальной и региональной сейсмологическими сетями Республики Дагестан. Таким образом, демонстрируется принципиальная возможность объединения различных систем мониторинга, осуществляющих анализ сейсмических сигналов в различных частотных диапазонах (подробнее см. в главах 2 и 3). Подобное объединение систем сейсмического мониторинга желательно было бы осуществить на всех плотинах I и II классов, образуя, тем самым, единую региональную сеть мониторинга ответственных объектов. Помимо традиционных задач с ее помощью появляется возможность решать новые, например, связанные с взаимодействием сейсмического режима и процессов перемещения водных масс при сбросах воды ГЭС.

Важным моментом В функционировании систем мониторинга является недостаточная оперативность реакции на аномальную ситуацию, что связано с разрывом процессов сбора данных, их обработкой и реагированием. Подтверждением этому является анализ аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, где сыграла роль сочетание изменений в геологической среде, в состоянии плотины и возникновении гидродинамического удара в системе плотина-водовод-агрегат (Лобановский, 2009; Тетельмин, 2011; Причины техногенной катастрофы..., 2017). Заметим, что по отдельности все явления известны, но не рассматривается возможность их сочетания, прежде всего потому, что каждое из явлений наблюдается «своим» видом мониторинга. Кроме того, есть процессы, например, вибрация при взаимодействии турбин и водоводов приплотинных ГЭС, создающие опасные ситуации, но не включенные в задачи мониторинга. Все отмеченное выше указывает на то, что есть процессы и их сочетания, которые остаются вне рассмотрения как используемых нормативов, так научных представлений о происходящей ситуации.

Сейсмические сигналы, используемые в каждом отдельном виде сейсмического мониторинга, искусственно разделяются (по времени, уровню или частотному диапазону),

но, по сути, являются частью единого волнового поля (рисунок 1.2). Такой подход, отмеченный, например, в СТО 70238424.27.140.032-2009 (приложение Г.2.1)² является наследием середины ХХ в., когда не было современных возможностей (работали преимущественно с аналоговыми сигналами, для которых существовали различные типы датчиков, в зависимости от диапазона регистрации «нужного» сигнала; не было современных вычислительных устройств и пр.). Но сейчас, если регистрировать сигналы одним, но «хорошим» инструментом (цифровым широкополосным датчиком с большим динамическим диапазоном и высокой чувствительности) и применять цифровую обработку волновой формы (с использованием методик, разработанных с учетом технологических возможностей ХХІ в.), то из наблюденного волнового поля можно выделить интересующий сигнал, как показано на рисунке 1.2. Для реализации такой возможности важно проанализировать существующие методики мониторинга, их недостатки и способы получать необходимые параметры с использованием современных знаний о волновом поле.



Рисунок 1.2 – Блок схема разделения волнового поля, используемого при сейсмомониторинге, по типам сигналов с указанием характерного частотного диапазона

С другой стороны, для учета причин возможных аварий важно обобщить сведения об опасных природных и техногенных явлениях и понять, какие параметры, их характеризующие, можно наблюдать сейсмическими методами (табл. 1.1).

² СТО 70238424.27.140.032-2009 Г.2.1. «Измерительные устройства для инженерно-сейсмологических и инженерно-сейсмометрических наблюдений. В силу единства природы регистрируемых параметров физических полей при выполнении этих двух видов наблюдений применяются принципиально одинаковые измерительные устройства. Отличие состоит в технических характеристиках, оно определяется различиями в масштабах измерений в частотных диапазонах регистрируемых сигналов».

№ п/п	Наименование процесса	Состояние проблемы	Возможность контроля процесса в сейсмич. полях, +/-	Методические сейсмические приемы			
	Территория Крайнего Севера						
1	Землетрясение / техногенное событие	Требует дополнительных разработок методов контроля слабых воздействий	+	Анализ кинематики и динамики записей (положение эпицентра, магнитуда, балльность)			
2	Просадки вечномерзлых грунтов, карстово-суффозионные процессы в районе линий ж/д магистралей	Требует дополнительных разработок методов контроля	+	Расчет спектра реакции от проезжающего поезда; Анализ динамики колебаний системы «насыпь-грунты оснований» (собственная частота, амплитуда)			
3	Изменение напряженно- деформированного состояния массива горных пород	Разработаны методы (геотехнические и геофизические)	+	Наблюдение и обработка акустической эмиссии и микросейсм, пересчет на базе теории упругости			
		Антропогенны	е объекты				
4	Крен сооружения	Разработаны методы (геотехнический мониторинг), для сейсмических методов требуется проработка	—/+	Получение пространственного распределения скоростных свойств грунтов (например, при малоглубинной сейсморазведке)			
5	Осадка фундамента	_////_	_/+	_////_			
6	Вибрационное воздействие	Разработаны методы	+	Анализ динамических параметров колебаний (спектр реакции, собственная частота, частота вынужденных воздействий, амплитуда, длительность воздействия)			
7	Изменение состояния конструкции в целом (вследствие землетрясения, взрыва)	Требует дополнительных разработок методов оперативного обследования	+	Анализ спектра реакции, собственных частот колебаний			
8	Изменение НДС отдельных блоков/элементов конструкции (например, сочленение конструкции с горным массивом)	Требует дополнительных разработок методов контроля	+	Анализ спектра реакции на внешнее воздействие, амплитуд, собственных частот, фаз, расчет на базе теории упругости с построением модели			
9	Вынужденные колебания гидроагрегатов (биения, кавитация)	_//////_	+	Наблюдение динамических параметров (частоты турбин, вынужденных воздействий, амплитуда, длительность воздействия)			

Таблица 1.1 – Сводка опасных природно-техногенных процессов для антропогенных объектов и территорий

Анализ таблицы 1.1 показывает, что в проблематике мониторинга сооружений и территорий их размещения существует круг неисследованных вопросов, решение которых возможно с привлечением сейсмологических знаний, что требует разработки дополнительных методов либо усовершенствование существующих. Все это составляет основу новых требований к аппаратурно-методическому комплексу сейсмомониторинга. Ключевым моментом новых требований является использование одного типа сейсмического оборудования.

При мониторинге важно отличить признаки опасных изменений в состоянии объекта от свойственных ему характерных вариаций во времени (например, сезонные вариации, температурные изменения) или при изменении режима функционирования (например, изменение уровня верхнего бьефа (УВБ) водохранилища ГЭС). Существенно рассмотрение взаимодействия объекта с окружающей средой (например, наведенная сейсмичность водохранилищ ГЭС), связь с работой оборудования, изменений состояния конструкций, согласование ритмов разных процессов.

При объединении сетей мониторинга разного уровня существует также ряд нерешенных вопросов – например, синхронизация всего измерительного оборудования по времени; способы разделения сейсмических сигналов различной природы, в том числе выделение «полезного» сигнала при высоком уровне промышленных помех и пр. К примеру, использование высокоточного времени играет существенную роль при организации сейсмических групп, расположенных в теле сооружения или требующих анализа фазовых соотношений сигналов – все это характерно для мониторинга. Использование стандартного типа GPS-сенсора приводит к ошибке при локализации эпицентра события, которая в масштабах глобального сейсмического мониторинга не так значительна, как при осуществлении локального сейсмического мониторинга. Для мониторинга ответственных сооружений необходима специализированная привязка точек наблюдения к единому времени (РТР протокол по стандарту EEE1588, точность не хуже 5 мкс) или для автономных станций с использованием GPS-синхронизатора (точность 100 нс). Все это требует специального нестандартного технического решения, как например, для Чиркейской ГЭС (*Капустян Н.К., 2012; Antonovskaya et. al, 2016*).

Типы антропогенных объектов и территории их размещения многообразны и индивидуальны. Но, несмотря на специфику, существуют общие закономерности, позволяющие классифицировать объекты и применять к каждому виду специализированные решения. Одним из наиболее востребованных в настоящее время для исследования регионов является Арктика. В частности, в Арктике особенно актуальна задача развития системы стационарного сейсмического мониторинга территорий (рисунок

1.3). Согласно данным С.В. Антипова и В.Л. Высоцкого (ИБРАЭ РАН, «Комплексная безопасность-2014») с 1961 по 2003 гг. в Арктике затоплено около 18000 различных радиоактивных объектов (реакторы и суда с ТРО), и вопрос об их техническом состоянии и необходимости реабилитации до сих пор не решен.



1 – техногенные события; 2 – карьеры; 3 – сейсмические станции Архангельской сети; 4 – сейсмические станции др. служб; 5 – районы утилизации отходов; 6 – углеводородные месторождения; 7 – АЭС; 8 – полигон. Места захоронения: 9 –твердых радиоактивных отходов, 10 – отработанного ядерного топлива; 11 – Северный морской путь; 12 – землетрясения

а – размещение объектов (по данным ИБРАЭ РАН и *Атлас..., 2011*) и сейсмичность (по данным NORSAR, Архангельской сети и КоФ ФИЦ ЕГС РАН); по данным ИБРАЭ РАН: *б* – фото контейнеров с ТРО на дне; *в* – блок «сухого» хранения ОЯТ, Мурманская обл.

Рисунок 1.3 – Карта сейсмичности Западного арктического сектора РФ и расположение ответственных объектов

Основные источники опасности – близость расположения могильников к углеводородным районам, перспективным к дальнейшим разработкам, а также выявляемая сейчас сейсмичность арктических территорий (Antonovskaya et. al, 2015; Рогожин и др., 2016).

Необходимость всестороннего учета и анализа влияния различных факторов, в основном природных, проиллюстрируем рядом примеров. Изучение возникновения аварийных ситуаций на морских платформах в Северном море, которое показывает, что наибольшее число аварий произошло из-за неблагоприятных грунтовых условий и штормов (*Lacasse*, 1999). Среднестатистическая интенсивность (частота) аварий на

морских трубопроводах составляет 0.2–0.3 аварий/год/1000 км (Лисанов и др., 2010), среди основных причин природные процессы занимают 12%. В первую очередь это геологические процессы и явления, которые представляют реальную угрозу целостности линейных сооружений: землетрясения, оползни, обвалы, экзарация и др. (ГОСТ Р 54382-2011; СТО Газпром 2-3.7-576-2011; Адушкин, 2013; Богоявленский, 2014; Маловичко и др., 2014). Слабые события и их вторичные эффекты, произошедшие в пределах размещения объекта, также приводят к авариям. Не стоит исключать подобных негативных процессов и на арктических территориях, которые, с точки зрения сейсмологии, весьма слабо изучены и на ликвидацию последствий которых потребуется куда более существенные затраты из-за недостаточно развитой инфраструктуры, удаленности объектов, суровых климатических условий и пр. факторов.

Заметим, что тенденция изучения именно слабых сейсмических событий позволяет получить важную информацию о тектонических процессах, о пространственном расположении активно деформирующихся областей горного массива, включающего месторождения углеводородов, об изменении его напряженно-деформированного состояния во времени (*Puзниченко, 1985; Соболев, Васильев, 1991; Рыкунов, Смирнов, 1992; Адушкин, Турунтаев, 2005 и пр.*). Согласно данным сейсмических служб NORSAR (Норвегия), Кольского филиала ФИЦ Единая Геофизическая служба РАН (г. Апатиты) и ФГБУН ФИЦКИА РАН (г. Архангельск), шельфовые территории Западного арктического сектора РФ характеризуются сейсмическим режимом отличным от того, что, отражено на картах OCP-2015, являющихся основой при проектировании ответственных сооружений (*СП 14.13330.2014*).

Путь решению многих проблем природопользования, числе к в том сейсмобезопасности, лежит в расширении территории, охваченной сейсмологическими наблюдениями, в усовершенствовании аппаратурной базы и методики анализа данных, в постановке специальных научно-поисковых работ (Панасенко, 1986; Капустян, 2012; 2014). По существу, ЭТО вопрос об актуализации современного Антоновская, сейсмомониторинга в Арктике с повышением чувствительности действующих сейсмических сетей. очередь, требует дополнительного что, В свою ИХ усовершенствования.

Плотная сеть сейсмических станций позволяет выявить природу и особенности проявления региональной сейсмичности, изучить современную геодинамику региона, без чего невозможно прогнозировать пути развития техносферы. Отметим, что на всем арктическом пространстве РФ сейчас действует только одна сейсмическая группа, принадлежащая КоФ ФИЦ ЕГС РАН, тогда, как на территории только Норвегии

установлено 4 сейсмические группы, не считая 32 одиночных стационарных станций, плотно покрывающих всю территорию страны.

С учетом наличия криолитозоны, труднодоступных регионов, недостаточного финансирования, и прочих неблагоприятных условий необходимо формирование специфической концепции создания системы мониторинга в Российской Арктике с проработкой технологических приемов установки оборудования и способов сбора и передачи данных. Естественно, что подобная сложная по технологии выполнения система должна быть многофункциональной, т.е. решать различные сейсмические задачи, помимо регионального и локального сейсмологического мониторинга.

1.2 Классификация систем сейсмического мониторинга

Сейсмометрические наблюдения во времени за состоянием объектов и процессами на территориях их размещения подразделяются на следующие виды:

сейсмологический мониторинг территорий (телесейсмический, региональный, локальный);

 инженерно-сейсмометрический мониторинг сооружений и транспортных систем, включая грунты основания;

– вибрационный мониторинг работы промышленных установок.

1.2.1 Сейсмологические наблюдения

Сейсмологические наблюдения в задачах обеспечения безопасности объектов ведутся для уточнения сейсмических воздействий (природных, техногенных или природно-техногенных (например, наведенная сейсмичность)) в районах их размещения. Район размещения объекта – территория, включающая площадку объекта (как правило, в пределах охраняемого периметра, где размещены основные и вспомогательные здания и сооружения), для ГЭС – верхний и нижний бьеф, водохранилище, для АЭС – в радиусе 30–40 км от площадки (СТО 1.1.1.03.0868-2012), на которой возможно проявление сейсмических явлений, способных оказать влияние на безопасность объекта.

Сейсмологический мониторинг проводится в следующих случаях:

объект является ответственным сооружением (Градостроительный кодекс..., 2013);

 объект расположен в районе с сейсмической активностью, принимаемой к учету при проектировании в соответствии с отраслевыми нормами;

 – функционирование объекта может привести к изменению сейсмического режима территории размещения (например, вследствие наполнения водохранилищ, закачки отходов и пр.);

 – функционирование объекта связано с возможностью возникновения техногенных сейсмических проявлений (например, падение ступеней ракетоносителей).

Цели и задачи сейсмологического мониторинга определяются исходя из специфики объекта, особенностей района работ, в котором осуществляется организация сейсмической сети. Сейсмическая сеть включает набор стационарных или временных сейсмических станций, образующих так называемую локальную сейсмическую сеть (иногла региональную). Выбор конфигурации той или иной сети определяется заданной точностью локации сейсмических событий и минимальной магнитудой. Основные положения методики работ, требования к техническим средствам измерения, контролируемым параметрам, обработке данных, результатам наблюдений и пр. определяется типом контролируемого объекта (АЭС, углеводородный терминал, ГЭС) и района его размещения (сейсмически активный, асейсмичный). Для ряда ответственных объектов существуют отраслевые стандарты создания локальной сейсмологической системы мониторинга, разработанные, к примеру, такими крупнейшими корпорациями, как ПАО «РусГидро», «Росатом». Созданием региональных систем сейсмического мониторинга занимаются подразделения Единой геофизической службы РАН и взаимодействующие с ней отдельные академические структуры, например Архангельская сейсмическая сеть ФГУБН ФИЦКИА РАН (http://fciarctic.ru/index.php?page=geoss).

Станции могут работать в различных режимах: непрерывном, ждущем (регистрация только событий, превышающих заданный уровень). При организации сейсмической сети следует обеспечивать требования Ростехнадзора о единстве средств измерений для применяемой регистрирующей аппаратуры и программ обработки данных, технической и информационной совместимости локальных и региональных систем сейсмологических наблюдений для сопоставимости измерений в результате исследований. Наблюдения для всех станций ведутся в едином времени, формат времени должен соответствовать стандарту региональной сети, точность – не хуже, чем в региональной сети.

При организации сейсмической сети должны учитываться следующие требования (*СТО 1.1.1.03.001.0868-2012*):

 общая физико-географическая и географо-экономическая характеристика района сейсмического мониторинга;

 данные о сейсмотектонической, геодинамической и сейсмологической изученностях района;

- структурно-тектонические особенности геологической среды района;

- положение и конфигурация предварительно выделенных зон BO3;

- наличие в районе действующих или закрытых сейсмических станций;

 наличие в районе очагов палеоземлетрясений, исторических, экзогенных или инструментально зарегистрированных землетрясений;

 наличие каталогов землетрясений района и характеристик сейсмического режима со схемой пространственного распределения эпицентров в радиусе до 300 км от объекта;

- предварительные оценки сейсмичности района, по материалам OCP;

 послойные скоростные характеристики для района работ, желательно на всю мощность земной коры;

 предварительная классификация грунтов площадки размещения ответственного сооружения по сейсмическим свойствам;

 предварительные оценки характеристик ожидаемых землетрясений и вызванных ими сейсмических колебаний.

Обобщение ряда нормативов позволяет определить следующие общие положения. Минимальное количество пунктов наблюдений, расстояние между НИМИ И чувствительность аппаратуры должны обеспечивать требуемую точность определения положения сейсмических источников минимальной заданной магнитуды в пределах контролируемого участка. Точность определения положения гипоцентральных параметров в значительной степени зависит от количества и взаимного расположения сейсмических станций и их положения относительно изучаемой зоны. Выбор пунктов наблюдения должен определяться с учетом относительно низкого уровня микросейсмического фона. Точность определения положения гипоцентров рекомендуется принимать с учетом точности выделения активных разломов и геодинамических зон ±0,5 км (для района с радиусом от 200 до 300 км) и $\pm 0,05$ км (для ближнего района с радиусом до 30 км).

1.2.2 Инженерно-сейсмический мониторинг

Инженерно-сейсмический мониторинг выполняется на опасных и уникальных объектах – в объеме сооружения и во вмещающей его геологической среде, в первую очередь в местах его сочленения с ней – в основании объекта, в бортовых примыканиях плотин и пр., с целью выявления изменений, которые могут привести к нарушению целостности или работоспособности объекта. Датчики устанавливаются стационарно, но часто регистрация ведется в ждущем режиме (например, для плотин ГЭС).

Инженерно-сейсмический мониторинг может выполняться самостоятельно или входить в комплекс контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), использующей как сейсмометрию, так и другие методики и инструменты. Наиболее распространены сочетания со следующими системами наблюдений:

- геодезическими,

- напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов оснований,
- фильтрации флюидов,
- сейсмологическим мониторингом,
- мониторингом уровня вибрации агрегатов,

- ультразвуковым просвечиванием.

Инженерно-сейсмический мониторинг может быть настроен на использование как одной методики, так и одновременно нескольких методик обработки и анализа данных. Основные методики опираются на выявление:

 – реакции сооружения на импульсные или квазиимпульсные внешние природные, техногенные или специально создаваемые искусственные воздействия. Сюда относятся землетрясения, промышленные взрывы, действие специализированных устройств, возбуждающих механические колебания (вибраторов);

собственных колебаний зданий и сооружений;

 вынужденных колебаний вследствие работы внутренних или удаленных техногенных источников механической вибрации,

 – микроимпульсов, связанных с дефектами материалов конструкций или горных пород с оценкой статистических свойств потоков этих импульсов.

1.2.2.1 Классификация методов обследования сооружений и грунтов их оснований

Кратко остановимся на классификации основных методов обследования сооружений и грунтов их оснований с целью показать место и роль сейсмических методик. Существующие методы обследования делятся на разрушающие методы (вскрытие конструкций, полов и др.) и неразрушающие методы (визуальное наблюдение, инструментальное обследование, маяки и др.).

Неразрушающие методы обследования зданий и сооружений в соответствии с (Гроздов, 1998; СП 13-102-2003) можно разделить на три группы:

- I. Визуальные наблюдения;
- II. Инструментальные методики;

III. Инструментально-технические методики.

I. Визуальные наблюдения позволяют определить качество и примерные характеристики конструкций путем их внешнего осмотра и применения простейших измерительных инструментов. Достоинство его проявляется в быстроте получения данных для заключения о состоянии и износе конструкций, недостаток – невозможность установления физико-механических свойств материалов. Существенно, что это – экспертный метод, результаты которого зависят от квалификации специалиста, выполняющего обследования. Этот метод следует отнести к косвенному способу оценки безопасности эксплуатации объекта.

II. В инструментальных методиках различные характеристики сооружений (прочность конструкций, собственные частоты и пр.), влияющие на их техническое состояние, определяются с помощью разнообразных средств измерений. К инструментальным методам в соответствии с устоявшейся строительной терминологией относятся: механический (полевой) метод, лабораторные испытания, натурные испытания конструкций, физический метод.

<u>Механический метод</u> направлен на определение прочностных характеристик стальных и бетонных элементов строительных конструкции. Механические методы нашли широкое применение при обследованиях благодаря своей относительной простоте, удобству и возможности быстро выполнить проверку состояния материала в различных точках конструкции. Достоинство – возможность количественной оценки физикомеханических свойств материала конструкций в полевых условиях без отбора проб; недостаток – ограниченная точность результатов. В основном, это оценка прочности бетона с помощью различных приборов (*Мурадов и др., 2016*).

<u>Метод лабораторных испытаний</u> образцов, взятых из конструкций, позволяет получить достоверные характеристики материалов. Это дает возможность использовать его при подготовке данных к проектам реконструкции. Недостаток метода – высокая трудоемкость, а иногда и невозможность отбора образцов материала в наиболее напряженных участках конструкций. Кроме того, получают «локальные» оценки, тогда, как «интегральные», определяющие состояние сооружения (например, работа кирпичной кладки совместно с раствором), практически недоступны методике.

<u>Метод натурного испытания конструкций</u> подразделяется на испытания статической и динамической нагрузок (*Натурные испытания конструкций*, 2017). При статических испытаниях конструкцию загружают неподвижными нагрузками в определенном порядке с постепенно нарастающим увеличением. Динамические испытания проводятся при нагрузках, резко изменяющих свои значения во времени или меняющих в процессе испытаний свое положение на испытываемой конструкции. Метод дает наиболее полную

информацию о напряженном состоянии конструкций с учетом их реальной работы. Недостаток метода – высокая трудоемкость. Способ целесообразен при обследовании и реконструкции капитальных или ценных зданий.

<u>Физические методы</u> испытаний основаны на использовании для определения характеристик материалов некоторых физических параметров (колебательного движения, электромагнитного поля, метод волны удара, магнитометрию и др.) (*Физические методы..., 2017*). Они не требуют отбора образцов и повреждений обследуемых конструкций. Методы требуют высокой квалификации исследователей, дорогостоящей аппаратуры, достаточно сложен и неоднозначен переход от измеряемых параметров к оценке надежности конструкций.

III. Инструментально-технический метод. Сюда входят инструментальные и визуальные методы обследования сооружений в сочетании с расчетными строительными комплексами (Лира®, MicroFe® и др.) для моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) и работы конструкций зданий с целью получения наиболее достоверной информации о состоянии обследуемого объекта.

Обследование выполняются в соответствии с СП13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» (*СП13-102-2003*). В оценку состояния сооружения входит обследование грунтов оснований, которые анализируются с применением следующих методик:

1) геодезические измерения; выполняются как с помощью традиционной нивелировки, так и с использованием современных цифровых датчиков, спутниковых GPS-технологий, возможно лазерное сканирование объекта. Данные методики позволяют определять геометрические характеристики объекта (здания или отдельных его частей) в пространстве, в том числе, измерять осадки и крены. Получаемые данные соответствуют состоянию на момент измерений. При достаточно редких по времени замерах традиционные методики не дают подробной динамики поведения объекта, более точные и подробные по времени методики характеризуются «шумом» связанным с флуктуациями положения объекта в пространстве, например, при статической ветровой нагрузке;

2) инженерно-геологические (геотехнические) наблюдения состояния грунтового массива в основании и в окрестности здания. Существует набор схем как разной трудоемкости и стоимости, так и разной разрешающей способности и информативности – от измерений в отдельных скважинах до межскважинного просвечивания (вплоть до получения трехмерного томографического изображения). В зависимости от выбора датчиков, можно вести мониторинг дифференциальных (послойных) или суммарных осадок грунтов основания, уровня воды, порового давления в породах (параметра,

используемого в расчетах за рубежом). Помимо скважин, важную информацию получают при размещении под фундаментной плитой сети датчиков давления на грунт, в сваях – вертикальных нагрузок (*Катценбах и др., 2003; Айме, 2005; Сухин, Ламперти, 2005; Капустян и др., 2010; Таракановский и др., 2010*). Наблюдения могут вестись непрерывно или достаточно часто по времени, т.е. существует возможность следить за особенностями динамики объекта;

3) измерения нагрузок и деформаций в конструкциях фундамента и надземной части. Здесь также существует определенный набор инструментов (Катценбах и др., 2003; Айме, 2005; Сухин, Ламперти, 2005; Вознюк и др., 2010). Наблюдения могут вестись в автоматическом режиме и, в том числе, непрерывно;

4) сейсмометрические методики, выполняемые различными измерительными устройствами – деформографами, наклономерами и сейсмометрами (велосиметрами, акселерометрами). Схемы наблюдений разнообразны, включают варианты возбуждения колебаний здания как искусственными (удары, вибраторы), так и естественными (ветер, микросейсмы) источниками. Сейсмометрические измерения дают «мгновенную» картину состояния объекта, наблюдая которую во времени можно получить разнообразную информацию об особенностях динамики сооружения.

Особенностью сейсмометрических методик является то, что схемы наблюдений могут быть достаточно простыми (вплоть до одной точки) (*Kapustian et al., 2013*). Кроме того, они дают возможность контролировать не только величины скоростей и ускорений, но и позволяют судить о совместной работе здания и грунтов основания, в том числе выявить неизвестные ранее явления.

Примером являются эффекты динамического взаимодействия зданий через грунт в условиях мегаполиса. Нами в эксперименте с натурными наблюдениями сделана оценка воздействий Ленинградского моста (через канал им. Москвы) на здание, проектируемое на расстоянии примерно 200 м от него (рисунок 1.4) (*Kanycmян и др., 2013*). В результате прохождения профиля от моста к зданию был определен эффект взаимного влияния одного сооружения на другое, возникающий при восприятии ветровых воздействий сооружением. При ветровых воздействиях возбуждаются собственные колебания сооружения, сооружение начинает излучать в окружающую среду (в том числе грунтовое основание) эти колебания, тем самым воздействуя на соседние сооружения и создавая дополнительные динамические нагрузки. Особое значение имеет ситуация резонанса, когда собственные частоты колебаний соседних сооружений совпадают. Эффект усиления колебания здания при наведении на него колебаний от соседнего моста был обнаружен при экспериментальном сейсмометрическом изучении собственных частот Башни-2000 в

Москва-Сити (Острецов и др., 2004). Было показано, что расположенный рядом мост «Багратион», развязанный от здания конструктивно, но связанный по грунтам основания, способен наводить на башню колебания, амплитуда которых может превышать значения собственных колебаний башни. Обнаружено, что собственные частоты моста и здания различны, т. е. нет явления резонанса.



1, 2, 3 – точки наблюдения; 4 – участок проектируемого высотного здания Рисунок 1.4 – Карта-схема исследования и фото Ленинградского моста

Необходимость прохождения профиля состояла в следующем. Во-первых, для того, чтобы правильно отделить на получаемой записи собственные колебания моста от прочих сейсмических сигналов. Процедура состоит в расчете спектров мощности записи, выделении пиков спектра (резонансов), расчете их амплитуд и определении законов ослабления амплитуд с удалением от моста (рисунок 1.5). Таким способом из набора пиков спектра были выделены несколько, характеризующихся ослаблением с расстоянием, что указывало на принадлежность их постоянно присутствующим колебаниям моста (из-за прохождения транспорта, ветровых пульсаций и пр.).





Рисунок 1.5 – Характерные спектры мощности записи в п. 2; стрелки – пики, связанные с собственными частотами



Во-вторых, изучались закономерности ослабления амплитуд с расстоянием (рисунок 1.6). По графикам видно, что затухание с расстоянием величины скорости смещения (амплитуд колебаний) на одних выделенных для анализа частотах происходит медленней, а на других частотах быстрее. Это говорит о том, что волны, распространяющиеся на частотах: 0.24; 1.1 и 1.64 Гц, являются в основном поверхностными, а на частотах: 1.37; 2.02; 3 Гц – объемными. Таким образом, собственные колебания моста через опоры «уходят» в грунты в виде смеси двух типов сейсмических волн с набором характерных частот. Определение типов волн, различающихся траекториями движения частиц при колебаниях, существенно при расчете сейсмических воздействий. Наблюденные значения частот сопоставлялись с величинами, полученными при расчетах собственных колебаний проектируемого здания (таблица 1.2).

№ формы колебаний	Мост	Проектируемое здание
1	0.24	0.24
2	0.32	0.29
3	1.10	0.74
4	1.37	0.95
5	1.64	0.97
6	2.02	1.21

Таблица 1.2 – Значения собственных частот колебаний

Обнаружено, что 1-я форма колебаний дома совпадает с собственными колебаниями моста. Точность определения значений собственных частот зависит от числа отсчетов в окне анализа при БПФ (512, 1024 и т.д.). При этом БПФ должно быть реализовано с сохранением фазовой части спектра сигнала, которым часто пренебрегают, т.е. необходимо вычислять задержку фаз у спектров двух окон, наложенных друг на друга, но сдвинутых во времени. Взяв большие значения числа отсчетов в окне анализа, мы получим высокое разрешение по частоте, но низкое во временной области. Исходя из опыта работ, число отсчетов в 512 или 1024 отс/с является достаточным. Тогда значение частоты определяется с точностью ±0.001 Гц. В своих работах мы, как правило, округляем значения до сотых долей герц (за исключением анализа сигналов, создаваемых геофизическими вибраторами или промышленными установками, или при необходимости разделить близкие по частотам сигналы), учитывая нелинейность характеристик сооружения, как колебательной системы.

Далее был выполнен расчет конечно-элементной модели здания на сейсмические воздействия, задаваемые в виде акселерограммы (программа «Лира»®), причем в качестве исходной акселерограммы взяты экспериментальные записи, полученные на площадки

строительства. Расчетная картина перемещений (рисунок 1.7) дает наибольшие значения 0.004 мм на верхних этажах, пересчет в ускорения на наведенной частоте, совпадающей с собственной для здания, дает 0.01 мм/c², что существенно ниже допустимых по *(СП 20.13330.2016)* 80 мм/c². Сравнение расчетных параметров динамики здания (перемещений, ускорений) при наведенных колебаниях и при ветровых воздействиях (40 мм/c²) показывает, что ветер оказывает существенно большее влияние на колебания, чем вибрации.

Приведенный пример демонстрирует, что наведение колебаний от соседних сооружений может представлять опасность не всегда, а при специфических условиях – очень близком расположении зданий и сооружений, особенностях конструктивных схем и пр. Справедливо также и то, что сейсмометрические методы позволяют учитывать при строительстве не только статические, но и динамические взаимодействия зданий через грунт.



Рисунок 1.7 – Результаты расчета модели для 1 формы колебаний (0.24 Гц), направление задания акселерограммы показано стрелкой

На основании наблюдений ветровых колебаний зданий, нами был предложен способ, основанный на регистрации собственных колебаний сооружений, возбуждаемых ветровыми пульсациями (Патент 2242026). Суть способа состоит в следующем. Всякое сооружение является источником механических вибраций с характерными параметрами,

определяемыми материалом, конструктивной схемой (тип несущих конструкций, их сочленение, нагрузки) и взаимосвязью сооружения с подстилающими грунтами. Как известно, колебания сооружения на собственных частотах возникают вследствие многих причин – воздействие природных и техногенных микросейсм (движение транспорта, жизнедеятельность людей, работа различных производственных предприятий и др.), землетрясений различной интенсивности, промышленных взрывов, порывов ветра. Особенностью последних является непостоянство амплитуд колебаний во времени, что определяется последовательностью (скважностью) порывами ветра и относительно малым затуханием собственных колебаний сооружений. Таким образом, учитывая постоянство значения собственной частоты, эти колебания можно рассматривать как гармонические амплитудно-модулированные сейсмические (Юдахин 2007: сигналы *др.,* u Сейсмологические исследования..., 2011).

Микроколебания сооружений собственных частотах на вследствие микросейсмических и ветровых воздействий происходят постоянно, что позволяет использовать этот факт для контроля состояния их конструкций. Существенно, что значения собственных частот сооружения определяются конструктивной схемой и его состоянием, т. е. колебания на собственных частотах – достаточно узкополосные, что позволяет выявлять их математическим аппаратом спектрального анализа (или накопления) даже при очень малой амплитуде (вплоть до сотых долей микрон) и при малом соотношении сигнал-помеха. Тут важно, чтобы был достаточно чувствительный регистрирующий сейсмометрический тракт (датчик, усилители, АЦП) и была возможность получать длительные записи с квазистационарным характером помех (т.е. чтобы статистические свойства помех мало менялись на интервале регистрации).

Анализ сигналов, генерируемых таким техногенным источником, с одной стороны, свидетельствует о состоянии конструкций, а с другой, может использоваться как сейсмический сигнал, просвечивающий геологическую среду (Юдахин и др., 2007).

1.2.3 Вибрационная диагностика

Вибрационный мониторинг предназначен для диагностики технического состояния машин (гидротурбин, газокомпрессорных и насосно-компрессорных установок и пр.) и оценки степени опасности повреждения (уровень механических вибраций). Выбор диагностических параметров вибрации зависит от типа исследуемых механизмов, амплитудного и частотного диапазона измеряемых колебаний (Барков, Баркова, 2004).

1.3 Общие требования к системе сейсмического мониторинга

На основании проведенного обобщения сформулируем общие требования к системе сейсмического мониторинга антропогенных объектов и территорий их размещения. Эти требования, по-существу, являются постановкой задачи, для которой в диссертации рассмотрены способы и примеры их выполнения.

Назначение современной системы комплексного сейсмического мониторинга:

 – обеспечение сейсмобезопасности строящихся и реконструируемых антропогенных объектов, выявление основных и вспомогательных способов наблюдения, а также проработка типовых схем мониторинга объектов;

– выявление аномальных участков в теле ответственного сооружения путем наблюдения в теле объекта пространственного распределения полей вибраций от техногенных внешних источников, а также собственных колебаний. Сопоставление характеристик аномальных участков с неоднородностями в грунтах основания при учете строительной модели работы конструкций и геолого-геофизических изысканий дает возможность указать причину появления дефектов;

 – оценка возможности чрезвычайных ситуаций природного и природно-техногенного характера на ранней стадии их возникновения.

Система сейсмического мониторинга должна соответствовать следующим требованиям:

 надежность, достигаемая по результатам совместного анализа данных различных измерений (сейсмологических, инженерно-сейсмических, вибрационных);

 адекватность (способность отражать заданные и/или наиболее значимые для безопасного функционирования параметры объекта с заданной погрешностью);

 точность (для разрешающей способности разных систем мониторинга соответствовать заданным значениям, определяемым в нормативных документах для данного объекта или условиями безопасной работы по результатам испытаний параметров объекта);

 – универсальность (возможность использовать предложенную схему для широкого класса ответственных объектов с модификацией для конкретного объекта);

– экономичность (характеризуется снижением затрат на реализацию системы путем оптимизации количества пунктов наблюдения, объема анализируемого материала, использования единого типа оборудования для сейсмических наблюдений разных видов). Например, при объединении сейсмологического и сейсмометрического и частично вибрационного мониторингов для плотин ГЭС реализуется система, в которой единой

аппаратурой ведутся одновременно оба типа наблюдений, что сокращает расходы на организацию системы мониторинга не менее, чем на 30%;

 технологичность (удобство и простота выполнения наблюдений, взаимозаменяемость типов датчиков и гибкость схем наблюдений, простые эксплуатационные свойства системы).

Система сейсмического мониторинга должна опираться на следующие принципы:

 соответствия наблюдаемых параметров тем величинам, изменения которых свидетельствуют о состоянии основных несущих конструкции и процессах в грунтовом массиве основания ответственного объекта. Означает, что выбираемые сейсмические методы проведения натурных наблюдений должны позволять фиксировать параметры, изменяющиеся при эксплуатации.

2) соответствия циклов измерений и характерных времен изменений во времени параметров объекта, например, ритма натурных наблюдений режиму инженерногеологических и техногенных процессов. Означает, что выбор режима опроса датчиков и/или проведения циклов сейсмических наблюдений должен позволять регистрировать вариации параметров, характеризующих состояние объекта, а также в интервалах изменяющихся нагрузок.

3) представительности информации об объекте; например, для выявления опасного явления данные по состоянию тела объекта и по грунтам оснований должны содержать взаимосвязанную информацию (трещины в стенах и осадка), что определяется методиками наблюдения и пространственным размещением пунктов. При этом получаемая информация должна обеспечить разработку математических моделей (в перспективе создание постоянно действующих математических моделей объектов). Информативность определяется техническими возможностями инструментальных средств. С одной стороны, сбора И передачи данных развитие технологий расширяет функциональность регистрирующего оборудования и позволяет интегрировать его элементы в сложные стационарные системы сбора сейсмологической информации. С другой стороны, расширение спектра задач и объектов мониторинга требует внедрения надежных и мобильных средств измерений.

В качестве примера возможной реализации вышеуказанных требований рассмотрим выполняемый нами проект «Система контроля сейсмичности» по объекту ПК «Шесхарис», площадка «Грушовая» (Краснодарский край), опираясь на опыт и программное обеспечение, разработанное ранее для системы мониторинга Чиркейской ГЭС. Площадка «Грушовая» предназначена для приёма хранения и отгрузки нефти и нефтепродуктов. Уровень ответственности I (первый) повышенный, проектное сейсмическое воздействие –

9 баллов. Согласно техническому заданию, система контроля (мониторинга) сейсмичности территории размещения объекта должна обеспечивать регистрацию сейсмических природных и техногенных событий с сейсмической интенсивностью проявлений на площадке не менее 1 балла.

В результате рекогносцировочного обследования, учитывающего уровни сейсмических шумов и их вариации во времени, а также физические возможности размещения оборудования в стесненных условиях застроенной площадки и возможности реконструкции, нами была предложена следующая конфигурация системы контроля сейсмичности площадки «Грушовая» (рисунок 1.8). Предлагалось разместить 1 широкополосный велосиметр и 1 акселерометр непосредственно на площадке и по одному широкополосному велосиметру на верхнем и нижнем полигоне относительно площадки «Грушовая». Следует отметить, что расположение точек определятся требованиями размещение станций на территории ОАО «Черномортранснефть» и организации передачи данных по внутренним (локальным) корпоративным сетям. В результате, предлагаемое расположение точек практически линейное, что не дает однозначного решения задачи локации эпицентров методом засечек при определенной разности прихода Р- и S-волн (рисунок 1.9).



Рисунок 1.8 – Расположение сейсмических пунктов (треугольники) в районе площадки «Грушовая» ПК «Шесхарис»



Рисунок 1.9 – Определение местоположения эпицентра землетрясения (звездочка) методом засечек с использованием сейсмоточек СКС (красные треугольники) и дополнительной точки в Геленджике (желтый треугольник)
В связи с этим, для получения однозначного решения было предложено установить дополнительно оборудование на сейсмостанции «Геленджик», тем самым состыковать локальную систему мониторинга площадки «Грушовая» с региональной сейсмической сетью ФИЦ ЕГС РАН.

Расположение пунктов сейсмических наблюдений на площадках показано на рисунках 1.10-1.12. В состав системы входят широкополосные аналоговые сейсмометры (см. гл. 2), средства регистрации и обработки данных, кабельные соединения и программное обеспечение.



Рисунок 1.10 – Местоположение пунктов сейсмических наблюдений на площадке «Грушовая»: велосиметр (красный треугольник) и акселерометр (синий треугольник)



Рисунок 1.11 – Местоположение пунктов сейсмических наблюдений на ЛПДС «Крымская»



Рисунок 1.12 – Местоположение пунктов сейсмических наблюдений на пл. «Шесхарис»

На объекте применены созданные по нашему техническому заданию автономные регистраторы ADAS3 (*TV* 4314-71332728-003-2013). Они предназначены для сбора данных сейсмических датчиков непосредственно в местах их расположения и передачи собранных

данных по сети Ethernet в стандарте 100BASE-FX WDM (передача по одномодовому оптическому волокну). Максимальная дальность передачи зависит от установленного модуля и составляет 20, 40 и 60 км. Синхронизация времени от GPSDO модуля FTS250, установленного внутри корпуса регистратора. Для приёма сигналов GPS используется внешняя активная антенна с длиной кабеля до 5 м. Подобная техническая реализация позволяет единовременно получать информацию со всех пунктов сейсмических наблюдений, тем самым минимизируя ошибку в определении эпицентра землетрясений.

Организация сбора и передачи данных. Для передачи данных от сейсмостанций в пункт сбора данных необходимо было задействовать существующую на объекте локальную сеть (рисунок 1.13). При подводе питания к станции предложено использовать стандартное подсоединение по кабелю UTP (1 и 3 на рисунке 1.13). Если подвод питания затруднителен, то можно использовать питание через Ethernet (PoE) (2 и 4 на рисунке 1.13), но в данной конфигурации не используется (может быть задействован при реконструкции площадки).



 автономный регистратор, 2 – автономный регистратор с РоЕ (в данной конфигурации не используется), 3 – маршрутизатор, 4 – маршрутизатор с соединениями с РоЕ (в данной конфигурации не используется), 5 – локальная сеть объекта, 6 – компьютер, 7 – GPS антенна

Рисунок 1.13 - Структура сейсмической сети с использованием сети объекта

Если длина соединения станции с точкой входа в локальную сеть превышает 100 м, можно использовать волоконную линию с медиаконвертером на стороне входа в локальную сеть.

Преимущества:

- не требует организации новой сети, что дает значительную экономию.

 изменения структуры сети станций при развитой объектовой локальной сети не требует больших дополнительных затрат. Недостатки:

– локальная сеть объекта управляется отдельно от сейсмической сети. При несогласованности действий администрации объекта неизбежны сбои в работе сейсмической сети. Устранение таких сбоев требует времени на выявление причин и согласование действий с администрацией объекта.

 подключение к сетевым коммутаторам и роутерам совместно с другими пользователями чревато многочисленными и трудно определяемыми сбоями в работе системы.

Сейсмические датчики предлагается устанавливать по схеме, представленной на рисунке 1.14. В качестве процедуры обработки и интерпретации сейсмических данных предложено следующее: автоматическое выделение событий, автоматическое определение балльности в точке наблюдения, сейсмологическая обработка с определением положения эпицентра с использованием программы WSG, принятой как стандарт в Единой геофизической службе РАН.



Рисунок 1.14 – Схема размещения датчиков в грунте (по инструкции одного из производителей сейсмической аппаратуры)

Таким образом, система контроля сейсмичности площадки «Грушовая» ПК «Шесхарис» состоит из аппаратурно-программного комплекса, позволяющего с центрального пульта вести автоматизированный сбор данных в непрерывном режиме, выделять сейсмические события и определять их балльность на площадке в режиме реального времени, создавать базу данных и их архивировать, подготавливать данные для сейсмологической обработки с определением параметров землетрясения (координат эпицентра, магнитуды), проводить автоматизировано поверку работоспособности сети и калибровку сейсмометрических датчиков. Результаты обработки представляются в цифровой и графической форме. Система может быть состыкована с общей системой безопасности.

1.4 Методическая документация и требования к квалификации специалистов

В настоящее время для мониторинга антропогенных объектов практически отсутствуют стандарты, излагающие общие технические требования к средствам контроля различных параметров, минимальном наборе средств измерений и пр., что приводит к неоднозначности и произвольности принятия решений при создании системы мониторинга (контроля состояния объекта). Например, это может проявиться в обилии разнообразных датчиков, неправильном выборе мест их установки, что в итоге сказывается не только на мониторинга, Вопросы качестве но И на его стоимости. создания систем сейсмологического мониторинга достаточно детально проработаны в специализированных стандартах для АЭС, ГЭС и нефтебаз (РД 34.20.501-95, СТО 70238424.27.140.032-2009; Магистральный трубопроводный транспорт..., 2012; СТО 1.1.1.03.001.0868-2012). Недостатками, на наш взгляд, являются рекомендуемые конкретные типы сейсмического оборудования, влекущие за собой часто неоправданные назначения мест их установки, и недооценка современных технических возможностей.

Существующие образовательные центры обучают лишь созданию систем мониторинга инженерных сооружений и/или специализированного оборудования (турбины ГЭС, реакторы и пр.), и/или опасных геологических процессов (например, <u>http://www.firestudy.ru/section_82.phtml; http://www.diamech.ru/training_program.html;</u>

http://basis-edu.ru/ru/nav/education/nav/training/com/training/int/1), в основном затрагивая теоретическую часть вопроса. Современные специалисты могут предложить необходимые средства измерений для мониторинга конкретного объекта (сооружение, установка, геологическая среда), грамотно разместить их на плане, установить и соединить в единую систему, наладить on-line доступ к базе данных, к окну интерфейса программного продукта, создать этот продукт и задать предельные пороги параметров мониторинга, т.е. развивается инженерная область системы мониторинга. Другая сторона, аналитическая, затрагивающая непосредственно определение предельно допустимых параметров мониторинга, анализ достоверности поступающей информации со средств измерений и, результатов различных самое главное, сводный анализ систем мониторинга, установленных на объекте, остается не затронутым.

В итоге мы сталкиваемся с парадоксальным фактом. Существует достаточно большой спектр современных методов по обследованию (мониторингу) состояния сооружений, позволяющие на ранней стадии выделить аномальные (ослабленные) зоны (см. разделы 4, 5), а в нормативных документах в качестве метода прописана оценка воздействий сооружения на сильное/разрушительное землетрясение. В результате на

сооружениях устанавливаются низкочувствительные датчики, способные «увидеть» уже случившийся факт, когда имеется возможность выделить заранее наиболее ослабленные места, которые могут подвергнуться наибольшему разрушению при землетрясении.

Другой, не менее острой проблемой, является формирование отчёта о результатах работы системы мониторинга и предоставление дальнейших рекомендаций. Об этом говориться, например, в (МРДС 02-08): «По результатам мониторинга составляется отчёт, который представляется Заказчику (застройщику), генеральному проектировщику и организации проводящей НТСС». Но, как ни печально, мониторинг инженерных сооружений заканчивается на этапе прохождения экспертизы при вводе системы мониторинга в эксплуатацию (отдельным блоком стоят сооружения специального назначения (АЭС, ГЭС)), дальше данные поступают в соответствующие подразделения, которые реагируют только на «тревогу». Анализ «жизни» объекта не ведется, хотя данные содержать необходимые сведения. Таким негативным примером могут служить установленные системы мониторинга на высотных зданиях г. Москвы. Колоссальный объем поступающей информации не анализируется (за исключением редких публикаций), возможно, это связано с тем, что соответствующий пункт не прописан ни в одних нормативных документах.

Рассмотрим, к примеру, один из параметров, наблюдаемый в процессе сейсмического мониторинга сооружения – собственные частоты колебаний. После сдачи в эксплуатацию высотного 44-х этажного жилого дома (г. Москва) уже более 14 лет наблюдаются изменения значений собственных частот (*Капустян, 2012; Антоновская и др., 2016*). Данный процесс весьма любопытен, он свидетельствует о процессах в железобетонных несущих конструкциях, в том числе усталости, ползучести и пр., но здание находится в хорошем состоянии и нет видимых дефектов, поэтому данные представляют лишь научно-исследовательский интерес.

Востребованность данных о «жизни» объекта, а не только об аварийных ситуациях, является «больным» вопросом нормативов по мониторингу, и все организации, занимающиеся созданием систем мониторинга, обходят его стороной. В качестве одного из вариантов можно предложить включение в перечень этапов мониторинга период настройки системы, во время которой происходит анализ данных и определение предельно допустимых значений (возможный диапазон вариаций) для различных параметров для каждого отдельно взятого объекта. Изменения внутри заданного диапазона допустимы, а выход за его пределы сопряжён с большой вероятностью аварии. Существенно, что вариации параметров внутри выбранного диапазона должны рассматриваться с точки зрения физики происходящих процессов, с привлечением строительной науки.

Выводы

В настоящее время в проблеме мониторинга ответственных объектов наблюдается ряд пробелов: недостаточная проработка методик; моральное старение созданных ранее систем мониторинга; отсутствие нормативов по комплексному анализу данных. Насущной стала разработка на основе сейсмических данных современных методических основ и практических рекомендаций по оценке состояния антропогенных объектов и территорий их размещения. Важным показателем актуальности и востребованности подхода является то, что на отраслевом уровне проработка ряда нестандартных решений и методических вопросов по указанным проблемам уже выполнена (основные результаты представлены в данной работе), начата реализация их на арктических территориях.

В диссертационной работе на разных примерах будут рассмотрены вопросы, касающиеся организации и анализа данных систем сейсмического мониторинга антропогенных объектов. Основной упор делается на рассмотрение следующих вопросов в области сейсмического мониторинга:

- анализируемые сигналы и возможности современной регистрирующей аппаратуры;

- региональный сейсмический мониторинг Западного арктического сектора РФ: состояние вопроса, перспективы развития, возможности для решения научных и прикладных задач;

- оценка состояния уникальных сооружений при предполагаемых сейсмических воздействиях;

- оперативное обследование и мониторинг состояния конструкций, грунтов основания и площадок размещения антропогенных объектов различного назначения при высоком уровне промышленных шумов;

- мониторинг возникновения недопустимой вибрации гидроагрегатов ГЭС вследствие гидродинамических пульсаций.

Сформированный круг вопросов составлен на основе анализа многочисленных публикаций и нормативных документов, свидетельствующих о недостаточной их проработке в данной предметной области. Предлагаемые решения в рамках данной работы не претендуют на решение всего круга проблем, существующих в сфере предупреждения и ликвидации ЧС, но непременно позволят сократить количество опасных ситуаций, возникающих на ответственных объектах.

2 Аппаратурно-методическое оснащение системы сейсмического мониторинга

В этой главе приведены результаты выполненного нами систематического обзора средств инструментального мониторинга с целью анализа их параметров, оценки степени пригодности для разных методик и выяснения возможностей унификации наблюдений. Существует широкий спектр геофизического оборудования для мониторинга изменений в геологической среде, контроля состояния конструкций уникальных сооружений и грунтового массива их оснований, в том числе выявления зарождения и динамики развития деформаций, а также их перераспределения в процессе эксплуатации объекта (*Николаев, Острецов и др., 2007; Острецов и др., 2008; Таракановский и др., 2010*). Основные направления развития современных средств инструментального мониторинга ответственных объектов можно разделить на четыре группы, в зависимости от задач, которые они решают:

1) контроль параметров напряженно-деформированного состояния строительных конструкций;

 контроль изменения пространственного положения объекта и структурной целостности важнейших элементов и сочленений;

 контроль параметров состояния грунтового массива в основании здания и зоне его влияния;

4) мониторинг характеристик собственных колебаний конструкции здания.

Рассмотрим более детально аппаратурные средства сейсмического мониторинга, включающего способы, которые в той или иной мере позволяют решать все перечисленные задачи.

2.1 Анализируемые параметры сигналов и сейсмическая аппаратура

Сейсмические сигналы принято подразделять в соответствии с частотным диапазоном, уровнем, видом волновых форм, длительностью и ритмом возникновения. Диапазоны частот анализируемых сейсмических сигналов в зависимости от области исследований и традиционно применяемых геофизических методов подразделяются на:

- низкочастотные: в среднем от 0.01 Гц до 20 Гц, классическая сейсмология,

 – собственно сейсмические: от 0.1 до 100 Гц, диапазон сейсмических исследований земной коры и инженерной сейсмологии,

 высокочастотные: 20-100 Гц, инженерная сейсморазведка и вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП),

– акустические (ультразвуковые): от сотен герц до кило герц, сейсмоакустика.

Следует отметить, что термин «сейсмические» часто используется как общий, т.е. когда рассматривается природа сигнала вне зависимости от частотного диапазона.

По уровням (амплитудам) сейсмические сигналы принято разделять на:

– слабые, амплитуда которых сравнима с уровнем микросейсм или ниже их уровня,

 выделяемые на фоне помех, т.е. по амплитуде в несколько раз больше уровня микросейсм,

- сильные движения, записи в эпицентральной зоне ощутимых землетрясений.

По длительности различают короткие (импульсы) и длительные – от нескольких минут до постоянно присутствующих (например, микросейсмы). По ритму обычно отмечают сигналы с известным временем появления (например, взрывы) или спорадические (микротрески, эмиссия).

Современная сейсмическая аппаратура включает следующие основные блоки: датчики колебаний (аналоговые сейсмометры), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блок усилителей и фильтров, блок калибровки сигнала, блок управления, блок передачи данных (на флеш-память, удаленный прием с передачей данных по проводам или радиоканалу), блок синхронизации точного времени (приемник GPS), блок питания. Блоки могут объединяться, средства регистрации встраиваться непосредственно в датчики.

Современные сейсмометры используются для регистрации двух типов колебаний: линейных и крутильных, первые – наиболее распространены. По регистрируемым величинам различают велосиметры (скорость смещения точки или колебательную скорость, иногда применяют термин виброскорость) и акселерометры (ускорения, виброускорения). По регистрируемому частотному диапазону применяются широкополосные или короткопериодные велосиметры. При наблюдениях используются 1компонентные сейсмометры или 3-компонентные (в едином корпусе или расстановка из 1компонентных) с ортогональной ориентацией осей датчиков, как правило, Z, X, Y (одна по вертикали и две в горизонтальной плоскости). Существуют сейсмометры с системой Гальперина, когда датчики сохраняют ортогональность между собой, но наклонены под одним и тем же углом к вертикальной оси. В такой симметричной трехосной конфигурации датчика оси чувствительности ориентированы под углами 35.26° к горизонтали и под 120° относительно друг друга в горизонтальной плоскости (рисунок 2.1). Подобная конфигурация гарантирует, что каждый ИЗ трех идентичных однокомпонентных датчиков одинаково реагирует на гравитацию (Graizer, 2009).



а – вид сверху относительно оси Z, б – вид сбоку относительно оси Y Рисунок 2.1 – Схематическая ориентация осей X, Y, Z и U, V, W (*Graizer, 2009*)

Наиболее распространенные по применению современные сейсмические датчики условно могут быть разделены на три типа (А, Б, В) (таблица 2.1). Кроме подбора типа датчика следует обратить внимание на тип регистратора (аналого-цифрового преобразователя): разрядность, динамический диапазон и прочие характеристики.

Тип	Полоса частот* Гц	Уровни сигналов min-max, приведены к ускорениям	Измеряемые величины	Традиционная область применения
А	от 0 до 100 0.5 -50	доли мкм/с ² – единицы м/с ²	ускорения скорости	Сейсмология, сейсморазведка, ГСЗ
Б	сотни	MM/c^2	скорости	Инженерная сейсморазведка
В	тысячи			Акустические (ультразвуковые) исследования, дефектоскопия

Таблица 2.1 – Классификация сейсмических датчиков

* Не обязательно в плоской части амплитудно-частотной характеристики

Параметры сейсмических сигналов, информативных для различных видов мониторинга, регистрирующая аппаратура, а также объекты мониторинга сведены в таблицу 2.2. Анализ таблицы 2.2. показывает, что принципиально, по параметрам регистрируемого сейсмического сигнала, различные виды мониторинга могут составлять единый комплекс наблюдений или иерархию систем мониторинга, но тут требуется тщательный подбор средств и схем измерений, а также методов обработки данных.

№	Сейсмический сигнал	Частота, Гц	Уровень сигнала	Объект мониторинга	Вид монито- ринга	Аппарату- ра (Тип см. табл. 2.1)	Методика
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Природные и техногенные сейсмические события	0.01-20	до единиц м/c ²	Здание или сооружение, технологическое оборудование, геологическая среда и литосфера в целом	С, ИС	А	(Патент 2150684; Аппаратура и методика, 1974; Инструкция, 1981; Гордеев и др., 2004; Капустян, Юдахин, 2007; Сейсмологические исследования, 2011)
2.	Действие специальных устройств, в том числе геофизических вибраторов	1-100	до 1 м/с ²	Здание или сооружение, геологическая среда	ИС	А	(Гурвич, Боганик, 1980; Селезнев и др., 1998; Капустян, Юдахин, 2007; Капустян и др., 2011)
3.	Транспорт: автомобильный, железнодорожный и метро	5-15 1-20	до 0.1 мм/с ² до 1 мм/с ²	Здание или сооружение, геологическая среда	ИС	А	(Капустян, Юдахин, 2007; Сейсмологические исследования, 2011)
4.	Ударные воздействия при строительстве, устройство свайных полей, способы: ударный виброзадавливание	10-100	~0.1 м/с ² ~0.01 м/с ²	Здание или сооружение, геологическая среда	ИС	А	(Антоновская и др., 2010; Капустян и др., 2011; Сейсмологические исследования, 2011)
5.	Вибрации при пусках или остановках мощных электрических машин, в том числе агрегатов ГЭС	N (число оборотов в секунду)	до 0.5 м/с ²	Плотины, здания ГЭС, оборудование, горные породы бортов водохранилища	ИС, В	A	(Савич и др., 1990; Капустян, Юдахин, 2007)

Таблица 2.2 – Параметры сигналов сейсмического мониторинга

1	2	3	4	5	6	7	8
6.	Механические вибрации при работе мощных электрических машин, в том числе агрегатов ГЭС	N, единицы- десятки	100 мм/с ² - 1 мкм/с ² *	Плотина, здания ГЭС, оборудование, горные породы бортов водохранилища	В	А	(обзор Капустян, Юдахин, 2007)
7.	Собственные колебания зданий и сооружений	0.1-20	10 мкм/с ² и более	Здание или сооружение, геологическая среда	ИС	A	(Селезнев и др., 1998; Патент 2140625; Патент 2242033; Патент 2242026; Патент 2365896; Юдахин и др., 2007; Антоновская и др., 2010)
8.	Микросейсмы, потоки микротресков	0.2-30 10-100	1 мкм/с ² и более	Горные породы, геодинамика региональных разрывных нарушений	С, ИС	А	(Гордеев и др., 2004; Капустян, Юдахин, 2007; Юдахин и др., 2008)
9.	Сейсморазведка грунтов оснований: инженерная, ВСП	до 100	единицы мм/с ²	Грунты основания здания или сооружения	ИС	Б	(Гурвич, Боганик, 1980; Замахаев, 1981; Савич и др., 1990; Антоновская и др., 2010; Капустян и др., 2011; Сейсмологические исследования, 2011)
10.	Акустические и ультразвуковые исследования материалов	1000 и более	-	Здание или сооружение, геологическая среда	Дефе- ктоско- пия	Б, В	(Савич и др., 1990; Дорофеев и др., 2005; ГОСТ 17624-2012)

* Значение приведено для удаления от ГЭС ~10 км, характерного для размещения станций сейсмологического мониторинга.

Типы мониторинга: С – сейсмологический; ИС – инженерно-сейсмометрический; В – вибрационный

При подборе аппаратуры для реализации конкретной задачи следует ориентироваться на следующие параметры, которые требует используемая методика:

- частотный диапазон,

 – минимальный или максимальный уровни регистрируемых сигналов, динамический диапазон,

 стабильность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) регистрирующего тракта во времени и при изменении внешних условий (температуры, атмосферного давления и пр.),

- помехозащищенность (особенно при работе на промышленных объектах),

- условия осуществления электропитания,

- способы хранения или передачи данных,

- возможность связи с другими станциями,

- привязка к точному времени,

- возможность калибровки без демонтажа оборудования,

- защищенность от внешней среды, особенно агрессивной.

Если используются методики мониторинга, основанные на анализе кинематических характеристик (времен вступлений импульсных сигналов) ИЛИ работающие на обнаружение интенсивных сигналов, допустимо использовать сейсмометры С нестолообразной (плоской) АЧХ в рабочем диапазоне частот, т.е. практически любые типы сейсмометров. Если планируется анализировать динамические характеристики записей (амплитуды, спектры), следует подбирать типы сейсмометров с линейной зависимостью сигнала на выходе от сигнала на входе, т.е., к примеру, не рекомендуется использование датчиков с пьезоэлементами, характеризующихся присутствием гистерезиса.

При проектировании систем сейсмического мониторинга допускается использовать в одной системе сейсмическую аппаратуру, регистрирующую разные физические величины (скорости и ускорения смещений), а также разного типа и с разным частотным диапазоном. Такая возможность, по нашему опыту, необходима при переоборудовании систем мониторинга для экономии средств. В тех случаях, когда предполагается наличие внешних динамических воздействий на здание или сооружение (от землетрясений, взрывов, транспорта), в системе в ключевых точках объекта и площадки должны размещаться акселерометры для получения акселерограммы реального воздействия и возможности использования этих данных в строительных расчетах.

При проектировании систем мониторинга следует ориентироваться на применение датчиков с наиболее широкими возможностями регистрации и избегать сейсмометров узкоспециализированных – они могут дополнять систему при необходимости, но не быть

основными. Это требование связано с концепцией использования единого датчика для регистрации сейсмического поля и последующим применением различных методик обработки.

Важными вопросами организации сейсмического мониторинга являются: подбор датчиков, регистраторов и размещение точек наблюдения. Выбор типа (или нескольких типов) датчиков и регистраторов для системы мониторинга сооружений должен предваряться рекогносцировочными наблюдениями на объекте, целью которого является оценка «шумности» места (уровня и частотного состава микросейсм, суточный ход) и возможности регистрации интересующих сигналов. Размещение датчиков по сооружению определяется его архитектурно-планировочным решением и зависит от прокладки электросетевых коммуникаций (кабельный каналов, отверстий в перекрытиях и пр.). Существенную роль играют также результаты аэродинамических испытаний (на макетах или компьютерный расчет), это позволяет выбрать точки с наибольшими (или наименьшими) амплитудами колебаний (*Николаев и др., 2006*). Заметим, что иногда производители сейсмической аппаратуры в технической документации указывают завышенные значения динамического диапазона, беря за основу в качестве максимального сигнала на полной шкале, а размах полной шкалы.

Несомненно, что сейсмометр должен регистрировать собственные колебания основного тона сооружения и нескольких более высоких гармоник. Для массивных сооружений основной тон колебаний лежит в диапазоне менее 1 Гц (обычно 0.2-0.8 Гц), поэтому и сейсмическая аппаратура должна подбираться по соответствующим параметрам. Более подробная информация о некоторых существующих типах сейсмометров и регистраторах и их технические характеристики представлены в таблицах 2.3 и 2.4 (заметим, что аппаратура усовершенствуется, появляются новые типы датчиков и регистраторов, обновленную информацию можно посмотреть пройдя по ссылкам, указанным в таблицах). Например, если планируется регистрация только собственных частот колебаний сооружений, то частоты выше 25-30 Гц регистрировать нецелесообразно (полезный сигнал маскируется помехами), регистратор должен быть не менее, чем 24-х разрядным и иметь динамический диапазон не менее 130 дБ.

Датчик	Кол-во компонент	Полоса частот, Гц	Чувствитель ность, В/м/с	Рабочий диапазон температур, °С	Вес, кг	Изготовитель	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8
Велосиметр СМ3-КВ	1	0.5–100	120 В/м/с	-10+40	8	Россия (Сейсмоприемники, http://reestrsi.ru/reestr/6897- Seysmopriemniki- magnitoelektricheskie-SM- 3KV.html)	Регистрация различных типов сейсмических событий.
Акселерометр СМG-5Т	3	0–100	20 B/g	-20+70	2.7/4.3		Регистрация различных типов сейсмических событий
Велосиметр CMG-6TD	3	0.03–100	2400 В/м/с	-40+75/ -20+85	2.5/2.7		"
Велосиметр СМG-40Т	3	1–50 0.03–50	3200 В/м/с 800 В/м/с	-20+75	2.5	Англия (<i>Guralp Systems</i> ,	"
Велосиметр CMG-3ESP	3	0.008–50 0.03–50	2000 В/м/с	-20+65	9.3/8.3	http://www.guralp.com)	Высокочувствительный широкополосный сейсмометр. Регистрация различных типов сейсмических событий. Чувствителен к транспортировке, перепадам температур
Велосиметр СМЕ-4211	3	0.0167–50	2000 В/м/с	-12+55	4.3	Россия (Измерительное, <u>https://zetlab.com</u> ; Левченко и др., 2009)	Регистрация различных типов сейсмических событий. Минус: нет постоянства характеристик в течение срока эксплуатации
Датчик крутильных колебаний METR-03	3	0.05–20	50 В/(рад/с)	-12+55	1	Россия (Измерительное, https://zetlab.com)	"

Таблица 2.3 – Сводка технических характеристик для наиболее распространенных сейсмических датчиков на территории РФ

1	2	3	4	5	6	7	8
Велосиметр Trillium Compact	3	0.05–100 0.008–100	750 В/м/с	-40+60	1.2	Канада (Nanometrics, http://www.nanometrics.ca)	Регистрация различных типов сейсмических событий
Акселерометр АС-73	3	0–200	20 B/g	-20 +70	3		Регистрация различных типов сейсмических событий
Короткоперио дный сейсмометр VE-53	3	1–80	1000 В/м/с	-20 +70	2.5	Швейцария (GeoSIG, <u>https://www.geosig.com/</u>)	"
Акселерометр ВС 1313	3	0.3–400	0.5 B/g	-40 +70	1.2	Россия (https://zetlab.com)	Регистрация сильных движений. Минус: нелинейность АЧХ в области низких частот
Акселерометр А1633	3	0.2–400	1 B/g (диапазон возможных значений от 0,01 до 10)	-40 +50	0.35	Россия (Геоакустика, http://geophone.narod.ru/TT X/ttx.html)	Регистрация сильных движений Минус: нелинейность АЧХ в области низких частот (до 4 Гц) и высоких (с 20 Гц)

Таблица 2.4 – Основные технические характеристики некоторых регистраторов, применяемых на территории РФ

Модель	Кол-во каналов регистрации	Разрядность АЦП	Динамический диапазон	Потребление энергии	Рабочий диапазон температур, °С	Вес, кг	Страна-изготовитель
1	2	3	4	5	6	7	8
КБС-3	3	22	108 дБ при 100 отс./с	1.44 Вт	-20+40	0.5	Россия (Юдахин и др., 2007)
ADSR3	3	32	130 дБ при 250 отс./с	1.92 Вт	-40+75	0.5	Россия (ТУ 4314-71332728-003- 2013; Antonovskaya et al., 2016)

1	2	3	4	5	6	7	8
DIOGEN- X/24S	2-4-624 или 3-6-9 24	24	120 дБ	До 6 Вт	-20+55	4	Россия (Портативная, http://www.ntkdiogen.ru/terra.h tml)
UGRA	3	24	100 дБ	7 Вт	-20+40	2.5	Россия (Мехрюшев, 2007)
ZET 048-I	16	24	124 дБ при 50 отс./с; 120 дБ при 250 отс./с	2 Вт	-30+50	2	Россия (Промышленный, http://www.tdgears.ru/device/id 39940.htm)
CMG- DM24	3, 6, 9, 12	24	135 дБ при 100 отс./с; 138 дБ при 40 отс./с	2.36 Вт	-40+60	2	Англия (Guralp Systems, http://www.guralp.com/)
GSR-24	3	24	133 дБ при 50 отс./с	1.68 Bt	-20+70	7.2	Швейцария (http://www.vulcan- seismicsystems.com/geosig_kat alog.php#registr)
Байкал	3	24	135 дБ при 100 отс./с	2 Вт	-30+60	2	Россия (Высокочувствительные, http://www.r-sensors.ru/)
GMSplus	3-15	24	137 дБ RMS при 50 отс./с	2.4 Вт	-20+70	4.5	Швейцария (GeoSIG, <u>https://www.geosig.com/</u>)
Centaur	3, 6	24	142 дБ при 100 отс./с	1.3 Вт	-20+60	1.9	Канада (Nanometrics, http://www.nanometrics.ca)
Регистр- 3MSD	3	24		0.5 Вт	-35+45	6.5	Россия (Воскресенский, 2017)

При проектировании систем мониторинга, в которых присутствуют датчики разных типов, важно осуществить возможность сведения всех получаемых данных в едином формате в единую базу с жесткой привязкой их к единому приемнику точного времени. При этом допустимо использование внутри системы локального времени при условии привязки всей системы к мировому точному времени. Подробнее о временной точности см. в (*Havskov, Alguacil, 2004*). Точность привязки по времени внутри системы (Δt) должна быть: $\Delta t \leq 0.1T_c$, где T_c – минимальный из характерных временных интервалов, как правило, период сигнала, динамические характеристики которого анализируются при мониторинге. Например, если система мониторинга использует две методики: подсчет количества высокочастотных импульсов и анализ низкочастотных гармонических сигналов с периодом T_c , то для оценки точности временной привязки следует ориентироваться на величину T_c и его соотношение с минимальной скважностью появления импульсов (τ), определяемой на этапе рекогносцировки или известная *a priori*.

Подключение всех датчиков к единому приемнику точного времени обусловлено использованием при обработке данных корреляционных методов (*Antonovskaya et al., 2014*) и осложняется выводом GPS антенны каждого датчика за пределы тела сооружения. В связи с этим целесообразно использовать регистраторы с точностью привязки к всемирному координированному времени (UTC) 1-20 мкс. Подобные регистраторы приемлемы при краткосрочном обследовании сооружения (несколько дней). При этом, по нашему опыту, необходимо убедиться в надежной работе микроконтроллера датчика (сохранении внутренних часов) при отсутствии синхронизации с UTC, чтобы не произошла потеря данных. Производить временную корректировку по данным GPS необходимо каждый день перед началом выполнения замеров, в конце рабочего дня проверять качество данных и корректность «привязки» их ко времени.

Например, при обследовании плотины Song Tranh-2, Центральный Вьетнам (*Antonovskaya et al., 2014*) и района ее размещения в нашем распоряжении было 7 велосиметров СМG-6TD. Это количество сейсмической аппаратуры позволило оперативно выполнить работы по обследованию тела плотины за несколько часов, что упростило выполнение работ, т.к. внутри плотины очень влажно и жарко. Но все это существенно осложнилось потерей данных, причем не только в этом эксперименте. При использовании аппаратуры Guralp отмечены частые сбои работы микроконтроллеров датчиков при отсутствии синхронизации с UTC, что приводило к потере данных (Данилов и др., 2013). Приходилось повторять измерения, в итоге, из 7 датчиков использовано 4.

При использовании методик, основанных на анализе слабых сигналов или выделении

сигналов из микросейсм (при этом изначально стоит задача регистрации любых типов сигналов), блок усилителей (или АЦП) должен быть максимально приближен к датчику. Это требование связано с тем, что выходные сигналы с датчика с амплитудами до 100 мВ могут быть сильно зашумлены электрическими помехами, наводимыми на линию, передающую сигнал с датчика к усилителю (АЦП). По опыту, допустимая длина линий – не более 50-100 м в зависимости от условий регистрации, на промышленных объектах линия должна быть значительно короче (до единиц метров).

При разработке технических требований для прокладки линий передачи данных необходимо предусмотреть максимальную их защищенность от агрессивной окружающей среды (в том числе молниезащиты) и вандальных воздействий. Ключевые точки системы мониторинга следует оснастить дублирующей линией передачи или системой сохранения данных на месте (например, на flash-карту), тем самым предусмотреть для системы мониторинга аналог «черного ящика». Для электропитания системы мониторинга (датчиков, устройств сбора и передачи данных) необходимо предусмотреть резервное электропитание в течение как минимум нескольких часов.

Количество датчиков в системе мониторинга зданий и сооружений определяется особенностью объекта и может варьироваться от единиц до нескольких десятков. Например, на высотных зданиях в Москве нами было установлено: при простой форме плана (ул. Давыдковская, ул. Дыбенко – по 1 датчику на верхнем этаже, при сложной форме – здание «Континенталь» на ул. Маршала Жукова – 4 датчика: два акселерометра в высотной части и два велосиметра в подземных конструкциях (*Kanycmян и др., 2010*) (рисунок 2.2).

Система мониторинга главного здания МГУ содержит 13 датчиков, расположенных на разной высоте внутри его (*Марченков и др., 2015*). Места расстановки датчиков должны быть согласованы с проектировщиком объекта или с эксплуатирующей организацией. Аппаратура регистрации должна удовлетворять всем требованием пожарной или иной отраслевой безопасности, принятой на объекте.

Таким образом, необходимо иметь четкое представление о целях и задачах создаваемой системы мониторинга, типах регистрируемых сигналов. Это поможет грамотно определить тип и количество необходимых датчиков. Рассмотрим примеры организации систем мониторинга для различных объектов.



 1 – геодезические измерения осадок, 2 – датчики давления на грунт, 3 – скважинные измерения осадок (послойных и суммарных), 4 – датчики порового давления, 5 – тензодатчики, 6 – сейсмометрические измерения колебаний, 7 – двухкоординатный инклинометр (измерение крена)

Рисунок 2.2 – Схема расстановки оборудования инструментального мониторинга высотного здания «Континенталь» в Москве

2.2 Современное состояние сетей сейсмических наблюдений на Крайнем Севере

Анализ состояния сейсмических сетей, ведущих мониторинг Арктики, необходим для понимания сложившихся подходов в этой области, современного уровня технического развития сетей, что позволит оценить масштабы работы при создании или модернизации системы сейсмологического мониторинга. Информация о современных стационарных сейсмологических сетях, занимающихся мониторингом Европейской части Арктики (рисунок 2.3) приведена в таблице 2.5. Данные (количество станций и тип оборудования) на момент чтения работы могут быть несколько устаревшими в силу возможных произошедших технических изменений в той или иной сети.

Анализ таблицы 2.5 и рисунка 2.3 показывает, насколько плачевно состояние мониторинга сейсмичности Российской Арктики. Архангельская сейсмическая сеть (АСС) в настоящее время частично закрывает «брешь» между станциями Кольского полуострова и республикой Коми, но вопрос по улучшению качества сейсмологического мониторинга

севера России по-прежнему остается открытым. Аппаратурное оснащение Российских сетей (количество станций, тип аппаратуры, организации передачи данных) в целом находится на удовлетворительном уровне, наблюдается положительная тенденция их модернизации.



Треугольники: стационарные сейсмические станции: черные – зарубежные, белые – российские, желтые – входят в состав УНУ «Архангельская сейсмическая сеть» Рисунок 2.3 – Сейсмичность Арктики за 2013 г.

В рамках соглашения между ФИЦ ЕГС РАН и администрацией Ямало-Ненецкого автономного округа в мае 2017 г. установлено три пункта сейсмических наблюдений высокочувствительной сети сейсмического мониторинга Северного Ямала (рисунок 2.3) (Виноградов, Пятунин, 2017). Используется широкополосная сейсмическая аппаратура фирмы Nanometrics. Выполняется установка временных сейсмических сетей в рамках выполнения международных проектов, например, SIOLA (Seismicity and neotectonics of the Laptev sea region) (Шибаев и др., 2017) или договорных работ, осуществляющих крупными корпорациями, например, как создание Лаптевоморской сети для задач ПАО «НК «Роснефть», но информация является закрытой.

Название сети	Кол-во датчиков	Краткое описание	Принадлежность станций	Источник
1	2	3	4	5
Сейсмическая сеть Финляндии	21	Сейсмологическая сеть Финляндии состоит из 15 станций, 4 станции (OUL, MSF, RNF, SGF) и станции AAL Университета Упсала. Датчики: -трехкомпонентные широкополосные STS-2 или CMG-3T; -короткопериодные S-13 или GS-13. Разработаны автоматизированные системы обнаружения и обработки сейсмических событий	Институт сейсмологии Геофизическая обсерватория Соданкюля Университет Упсала	http://www.seismo.helsinki. fi/english/observation/statio ns.html
	FINESS array	Входит в сейсмологическую сеть Финляндии, диаметр 2 км, в центре 3-комп. сейсмометр SP, вокруг (3 круга) 15 вертикальных датчиков SP	Институт сейсмологии	http://www.geophysica.fi/p df/geophysica_1995_31_1_ 071_tiira.pdf
Локальная сейсмическая сеть	22	17 станций с 22 датчиками (3-комп) расположенных на о. Олкилуото	Posiva Oy	http://www.posiva.fi/en/dat abank/search_of_material/l ocal_seismic_network_at_t he_olkiluoto_site_annual_r eport_for_2012.xhtml
Сейсмическая сеть Швеции	61	Шведская национальная сейсмическая сеть состоит из широкополосных сейсмометров CMG-3TD, STS-2.	Университет Упсала, Исследовательское агентство обороны Швеции	http://www.guralp.com/the- swedish-national-seismic- network/ http://snsn.geofys.uu.se/
Сейсмическая сеть Норвегии	34	Норвежская национальная сейсмическая сеть состоит из датчиков: Trillium 120, SS-1 Ranger, Güralp 6TD	Университет Берген Ассоциация Норвежской нефтяной промышленности	http://www.geo.uib.no/seis mo/naar-jorden- skjelver/index.php?topic=n nsn⟨=es

Таблица 2.5 – Сводная таблица стационарных сейсмических сетей Европейской части Арктики

1	2	3	4	5
Сейсмическая сеть Норвегии	4 сейсмические группы	Частота опроса 40 Гц. NOA (PS27): диаметр 60 км, состоит из 7 подгрупп, 42 датчика: 35 CMG-3T hybrid (вертикальные SP), 7 CMG-3T (3-комп., BB) NORES: диаметр 3 км, состоит из 17 датчиков: 8 GS-13 (horizontal, SP), 9 GS-13 (3-комп.) ARCES-PS28: диаметр 3 км, состоит из 25 CMG 3T hybrid (3 комп., BB) SPITS (AS72) совместно с радионуклидной станцией RN49. SPITS-AS72: диаметр 1 км, состоит из 9 датчиков: 3 Guralp- BB (вертикальнаый), 6 Guralp-BB (3 комп.). Частота опроса 80 Гц. RN49: NOP49 (CINDERELLA автоматический пробоотборник воздуха для обнаружения радиациии) и NOX49 (SAUNA полностью автоматическая система обнаружения радиоактивного ксенона)	NORSAR	http://www.norsardata.n o/
	3	JMIC (AS73): сейсмометр STS2 BB. Частота опроса 100 Гц AKN: сейсмометр Guralp CMG3ESP. Частота опроса 200 Гц TROLL: широкополосный сейсмометр STS2.5. Частота опроса 100 Гц		
	Инфразвуков	IS37: диаметр 1 км, состоит из 10 пунктов, в которых		
	ая группа	установлены микробарометры		

1	2	3	4	5
Сейсмическая сеть Дании (о. Гренландия)	15	Датская сейсмологическая сеть: Дания: BSD: датчик STS-2 (3 комп.) с регистраторами Nanometrics HRD24-32 LLD: короткопериодный датчик S-13 (вертикальный) с регистратором Nanometrics RD3 COP: 3 сейсмометра STS-1 VBB с регистраторами Nanometrics HRD24-32 GID: короткопериодный сейсмометр GBV-316 (3 комп.) MUD: 3 короткопериодных сейсмометра S-13 с регистраторами Nanometrics RD3 Гренландия: SFJ: 3 сейсмометра STS-1 VBB NRS: STS-2 с регистратором Nanometrics HRD24-32 DAG: STS-2 (3 комп.) SCO: STS-2 (3 комп.) с регистратором Nanometrics HRD24-32	Геологическая служба Дании и Гренландии	http://seis.geus.net/statio n_book.html
Сейсмическая сеть Дании (о. Гренландия)	25	25 широкополосных станций с датчиками STS-2 (преобладающая часть). Гренландская арктическая сейсмическая сеть мониторинга GLISN.	Дания (The Geological Survey of Denmark and Greenland), Канада (Natural Resources Canada), Германия (GEOFON), Франция (GEOSCOPE), Италия (INGV), Япония (JAMSTEC, National Institute of Polar Research), Норвегия (NORSAR), Швейцария (Swiss Seismological Service), Польша (Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences), CША (IRIS, PASSCAL, LDEO Columbia University)	http://glisn.info/ http://www.iris.edu/gma p/DK http://geofon.gfz- potsdam.de

1	2	3	4	5
Кольский Филиал Федеральный исследователь	5	 трехкомпонентная широкополосная сейсмостанция АРА в г. Апатиты, короткопериодная станция GFR на Кировском руднике, Хибинский массив, короткопериодная станция RASV на руднике Расвумчорр, Хибинский массив. Тириберка Ковдор 	КоФ ФИЦ ЕГС РАН	http://www.krsc.ru/
ский центр Единая	2	арх. Шпицберген в районе пос. Баренцбург две трехкомпонентные сейсмостанции BRBA и BRBB.	КоФ ФИЦ ЕГС РАН	
Геофизическа я служба РАН	1	трехкомпонентная широкополосная сейсмостанция «Ловозеро» (LOV)	IRIS	
	Апатитский ARRAY	сейсмическая группа АРАО в 17 км от г. Апатиты состоит из 9 короткопериодных сейсмометров GS-1.	Коф фИЦЕГС РАН	http://www.krsc.ru/AP0
	акустический комплекс	три микробарографа, установленны неподалеку от датчиков внутреннего круга Апатитской сейсмической группы		http://www.kise.iu/Ai o
Сейсмостанции Карельского научного центра РАН	4	три цифровые станции Cossack Ranger II с датчиками CM3- КВ: KOS (Костомукша), РІТ (Питкяранта) и КЕМ (п. Кривой Порог, Кемский р-н). Петрозаводск – CMG-6TD, CMG-3ESPS (GSR-24)	лаборатория геофизики Институт геологии КарНЦ РАН	(Юдахин и др., 2003; Шаров и др., 2007)
Сейсмостанции Коми научного центра УрО РАН		Сейсмостанция в г. Сыктывкар (SYK) и в районе окраины с. Бакур, находящемся на левом берегу р. Ижма (IZHMA)	Геофизическая обсерватория "Сыктывкар"	(Удоратин, 2004)
Архангельская	7	СМG6TD; СМG3ESPC (2 шт), СМG-40T с регистраторами GeoSIG, TC-120s регистратором Centaur	ФГБУН ФИЦКИА РАН	http://www.arhsc.ru/ind ex.php?page=igeo
сеть	3	CM3-KB, CM3-OC	ФГУБН ФИЦКИА РАН и ФИЦ ЕГС РАН	http://www.ceme.gsras.r u/new/struct/

Примечание: Данные могут быть несколько устаревшими в силу возможных произошедших технических изменений в той или иной

сети.

Для создания системы сейсмического мониторинга для Западного арктического сектора РФ, был принят поэтапный подход (Антоновская, 2009). Осложняющие факторы для развития сети: мощный осадочный чехол (Отчет..., 2004; Балуев, 2013)), вечная мерзлота, сложные климатические условия, отсутствие необходимой инфраструктуры на большей части территории.

<u>Первый этап (2001–2004)</u> – закладка основ сейсмического мониторинга. На базе Института экологических проблем Севера УрО РАН (в настоящее время ФГБУН ФИЦКИА РАН) по инициативе чл.-корр. РАН Ф.Н. Юдахина и поддержке академика Н.П. Лаверова были заложены основы сети. Совместно с Геофизической службой РАН (сейчас ФИЦ ЕГС РАН) было установлено четыре опорных пункта сейсмических наблюдений, охватывающих центральную (материковую) часть Архангельской области. На этом этапе отрабатывались методические подходы по локализации телесейсмических землетрясений – подбор фильтров, анализ волновых форм, закладывались основы сейсмологического бюллетеня и принцип формирования самой структуры сейсмической сети (способы сбора, передачи и хранения данных) (*Французова, Ваганова, 2007*).

<u>Второй этап (2005–2010)</u> – расширение системы с установкой дополнительно трех пунктов сейсмических наблюдений. На данном этапе отрабатывались подходы по выявлению природы регистрируемых региональных и локальных событий и их локации, подбирались фильтры, были заложены основы базы данных волновых форм техногенных событий и соответствующего бюллетеня (*Юдахин, Французова, 2006; Морозов, 2009; Французова и др., 2011; Юдахин, Французова, 2011)*.

<u>Третий этап (с 2011 по настоящее время)</u> – установка опорных пунктов сейсмических наблюдений в Западном арктическом секторе РФ, захватывающим арктические архипелаги и побережье *(Антоновская и др., 2013; Данилов и др., 2013)*. Анализ рисунка 2.3 показывает, что в настоящее время создана базовая конфигурация сети Западного арктического сектора РФ. Доступность к волновым формам зарубежных сейсмических сетей позволяет максимально охватить исследуемый регион *(Конечная, 2015)* и направить основной ресурс на установку новых станций в восточной части региона.

В настоящее время Архангельскую сейсмическую сеть можно рассматривать в качестве достаточно универсального инструмента, предназначенного для решения разнообразных задач по мониторингу Европейского сектора Арктики: от изучения глубинного строения земной коры (*Ваганова, 2012; Morozov et al., 2015*) до разработки подходов предотвращения ЧС природного и техногенного характера (*Конечная, 2015; Антоновская и др., 2017*). В 2013 г. Архангельская сейсмическая сеть (АСС) получила международный код АН (<u>http://www.fdsn.org/networks/)</u>, в 2014 г. – зарегистрирована в

качестве уникальной научной установки (УНУ) на официальном сайте «Современная исследовательская инфраструктура Российской Федерации» <u>http://www.ckp-rf.ru/usu.</u> С 2014 г. лаборатория сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН полноправный партнер международного сейсмологического центра ISC и участник глобального сейсмического мониторинга.

2.2.1 Технико-методические приемы по установке сейсмических станций в условиях Крайнего Севера

Отметим, что специализированные нормативные документы по созданию систем сейсмического мониторинга разрабатываются лишь крупными корпорациями, такими как «Росатом», ПАО «РусГидро», для решения конкретных задач безопасной эксплуатации ответственных сооружений их ведомства, в том числе расположенных в зонах с высокой активностью (СТО 70238424.27.140.032-2009, СТО 95 103-2013). сейсмической Отличительной чертой этих документов являются общие рекомендации по структуре и аппаратурному наполнению систем мониторинга, но не рассмотрены проблемы технического характера. В качестве примера приведем ряд вопросов, с которыми приходится сталкиваться: на какой глубине и какой высоты должен быть создан постамент; какой тип конструкции (монолитная, сборная и пр.) можно применять при заложении фундамента для сейсмостанции; какую марку цемента использовать, предусматривается допустимость армирования конструкции? При этом использование того, что не прописано в нормативе не принимается заказчиком. В монографии (Havskov, Alguacil, 2004) рассмотрен ряд принципиальных технических вопросов по организации пункта сейсмических наблюдений и сети в целом. Тем не менее, многие технические решения приходилось адаптировать под российскую действительность.

С большими трудностями приходится сталкиваться при установке сейсмических станций за Полярным Кругом. Сотрудниками лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН была возобновлена работа пункта регистрации сейсмических событий в пос. Амдерма (2010 г.). Реальная ситуация в поселке такова, что поставить датчики в том же месте, где они стояли ранее (угольная шахта) (Виноградов и др., 2012), не представляется возможным. В настоящее время сейсмологический пункт находится на окраине поселка – на территории метеостанции в здании бывшего склада. В качестве постамента используется фундаментный железобетонный блок (положительными свойствами которого является устойчивость к воздействию воды и перепадам температуры), заглубленный в землю на 2 м, в него вмонтированная стальная бочка с утепленными

стенками и крышкой. Внутри бочки установлен датчик (рисунок 2.4). Скорее всего, в связи с планируемым возрождением пос. Амдерма как базы авиации, придется подбирать новое место для станции.



Рисунок 2.4 – Пример установки датчика пункта сейсмических наблюдений «Амдерма»

На рисунке 2.5 приведены суточные спектры мощности микросейсмического фона в сравнении с обобщенными уровнями по (*Peterson, 1993*) для ряда арктических пунктов сейсмических наблюдений, в том числе и для «Амдермы», использован пакет прикладных программ для набора задач сейсмического мониторинга (Дягилев, 2012). Видно, что выбранное решение для установки станции «Амдерма» достаточно хорошее. В целом уровни микросейсмического фона станций сети находятся в допустимом диапазоне, в ряде пунктов сказывается влияние техногенных объектов, воздействие которых нивелируется подбором фильтра. Качество записей подтверждается регистрацией землетрясений, в том числе в районе арх. Новая Земля, которые не были обнаружены сетями других арктических служб.

В 2011 г. был открыт пункт сейсмических наблюдений «Земля Франца-Иосифа» на о. Земля Александры архипелага Земля Франца-Иосифа (арх. ЗФИ) (Данилов и др., 2013). В 2014 г. на этом же острове был открыт еще один пункт сейсмических наблюдений «Омега» на территории базы НП «Русская Арктика» (Антоновская и др., 2016). Спектры мощности микросейсмического фона для этих станций приведены на рисунке 2.5. Несмотря на «обитаемость» места, спектры укладываются в допустимый диапазон.



HNM, LNM – спектральные кривые для высокого и низкого уровней микросейсмического фона (*Peterson*, 1993); пункты сейсмических наблюдений: SPA0 – центральный датчик норвежской группы SPITS, ZFI2 – «Земля Франца-Иосифа», AMDE – «Амдерма», SVZ – «Северная Земля», OMEGA – «Омега»

Рисунок 2.5 – Спектры мощности микросейсмического фона для ряда арктических сейсмических пунктов

На рисунках 2.6 и 2.7 приведено распределение суточных спектров мощности микросейсм в сравнении с обобщенными уровнями по (Peterson, 1993) для пункта сейсмических наблюдений ZFI2 за 2012 г. и с августа 2015 по май 2016. В целом уровень шума находится в допустимых пределах, исключением является октябрь, когда уровень микросейсм выходит за верхний допустимый уровень (NHNM) ниже 2 Гц, и май совпадает с NHNM в области 0.6-1 Гц. Согласно акустическим практически исследованиям (Roth et al., 2012), проводимых в арктических морях, наиболее высокий уровень шума отмечается в сентябре-октябре и связан с сезоном открытой воды и ветровыми вариациями. В работе (Demuth et al., 2016) выявлена корреляция уровня низкочастотного шума (ниже 5 Гц) с высотой морских волн на удалении от 450 до 900 км от берега. Таким образом, завышенный уровень микросейсм в низкочастотной области, особенно в октябре, получаемый по данным сейсмического пункта ZFI2, можно связать с метеофакторами, разумеется, подобный факт требует более тщательного изучения. Повидимому, все эти факторы свойственны особенностям шумов при сейсмологической регистрации на арктических островах.

В результате проведенных работ появилась возможность обобщения имеющегося опыта по установке пунктов сейсмических наблюдений, за исключением установки скважинных сейсмометров, с учетом финансовой составляющей, а точнее, практически полным ее отсутствием, что, к сожалению, является типичной проблемой последних лет. Была выработана концепция размещения оборудования в условиях Крайнего Севера,

включая вопросы организации сбора и передачи сейсмических данных. Рассмотрим основные структурные элементы пункта сейсмических наблюдений.



Рисунок 2.6 – Сравнение спектров мощности микросейсм и обобщение с (*Peterson, 1993*) для пункта сейсмических наблюдений ZFI2 за 2012 г.



Рисунок 2.7 – Сравнение спектров мощности микросейсм и обобщение с (*Peterson, 1993*) для пункта сейсмических наблюдений ZFI2 за 2015-2016 гг.

2.2.1.1 Пункт сейсмических наблюдений

В общем случае пункт сейсмических наблюдений состоит из сейсмического сооружения (бункера/сейсмопавильона) и центра сбора данных. Сейсмический бункер представляет собой гидро- и теплоизолированное сооружение, где на бетонном постаменте устанавливаются сейсмические датчики, а вне постамента размещается оборудование, необходимое для передачи данных на локальный компьютер (современная сейсмологическая аппаратура не требует наличия локального компьютера, т.к. он уже встроен в блок регистратора). Бетонный постамент должен быть надежно соединен со скальными или плотными грунтами (мергель, известняк), изолирован от влияния метеофакторов (Данилов и др., 2013).

Одним из определяющих условий для установки пункта сейсмических наблюдений является наличие скальных грунтов. Согласно (*Отчет..., 2004; Балуев, 2013*), Русская плита представляет собой область погружения кристаллического фундамента от Балтийского щита на восток и юго-восток в Мезенскую синеклизу, причем абсолютные отметки поверхности фундамента составляют от -0.5 до -1.5...-2.0 км (в осевых зонах некоторых грабенов они превышают -4.0 км). Данный геологический факт определяет специфику сейсмического мониторинга континентальной части Европейского Севера (Архангельской обл.). Данный факт, а также, как отмечалось выше, неблагоприятные инженерно-геологические условия создают значительные трудности при поиске места и создания постаментов для пунктов сейсмических наблюдений.

Накопленный опыт позволяет нам сформулировать следующие критерии к месту размещения стационарного пункта сейсмических наблюдений в Арктике (Данилов и др., 2013; Антоновская, Данилов, 2014):

 место установки должно быть значимым для исследования геодинамики территории и наилучшим образом дополнять существующую сейсмическую сеть;

- необходимо избегать районов с залеганием слоев супесей в верхнем горизонте;

 место установки должно быть максимально изолировано от внешних источников колебаний (иметь низкий уровень природных микросейсм и техногенных вибраций);

– наличие помещения (при отсутствии создается новое), в котором размещается необходимое электронное оборудование, запасные аккумуляторы и пр. (t>0° C);

 предусмотреть возможность прокладки кабелей (электрический напряжением 12, 24 или 220 В и/или сигнальный провод) от места сбора данных и энергоснабжения до места размещения регистрирующей аппаратуры;

– возможность передачи данных в центр сбора и обработки в режиме on-line, в режиме, близком к реальному времени, либо в любом другом доступном режиме;

- предусмотреть антивандальную защиту.

Пункт сейсмических наблюдений должен:

– быть максимально заглублен для уменьшения шума, вызываемого экзогенными природными процессами и техногенной деятельностью (глубина ямы определяется местными грунтовыми условиями, как правило, до 3-4 м. Идеально – установка датчика в скважину или в штольне);

- обеспечивать термо- баро - и гидроизоляцию;

– иметь бетонный постамент (или плиту), изготовленный с применением соответствующей марки цемента и отвязанный от стен сооружения. Размеры постамента (плиты) зависят от индивидуальных особенностей каждого конкретного пункта сейсмических наблюдений, но, как правило, не превышают 1000x1000x800 мм.

Пункт сейсмических наблюдений, к примеру, можно организовать в неэксплуатируемой шахте. Однако необходимо учитывать возможное присутствие эндогенных природных микросейсм, обусловленных процессами переработки внутренних напряжений средой: шумом в солевых пластах, разгрузкой напряжений в горных выработках и др. (*Капустян, Юдахин, 2007, Верхоланцева, Дягилев, 2015*). Наиболее стандартным способом является строительство погреба или колодца (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Вид пунктов сейсмических наблюдений в виде погреба (а) и колодца (б) на примере организации Архангельской сейсмической сети

При организации пункта сейсмических наблюдений в арктических условиях, когда время выполнения работ может быть сильно ограниченно, доставка техники и соответствующих специалистов весьма сложная процедура, можно использовать готовые конструкции. Например, простым и недорогим вариантом является использование металлических бочек от горюче-смазочных материалов объемом 200 л (рисунок 2.9), которые нужно дополнительно гидроизолировать и утеплить. Данный вариант можно использовать при создании временных пунктов сейсмических наблюдений (ПСН), как, например, при организации пунктов сейсмических наблюдений на о. Земля Александры арх. ЗФИ. Сейчас ведутся работы по замещению на более надежные устройства.



Рисунок 2.9 – Пример организации бюджетного сейсмического сооружения

Отметим, что существует большое количество методов и материалов для гидроизоляции, которые подбираются в зависимости от условий работ. Например: штукатурная, обмазочная, литая, инъекционная, оклеечная гидроизоляции, гидроизоляция проникающего действия (Современные методы гидроизоляции, 2017). Термоизоляция должна обеспечивать минимальные перепады температуры внутри сейсмического сооружения. В качестве термоизоляционных материалов в основном применяется вспененный полистирол, монтажная пена, иногда – минеральная вата. Некоторые зарубежные коллеги в качестве утеплителя используют вакуумно-изоляционные панели (ВИП), обладающие крайне низким коэффициентом теплопроводности при той же толщине, что и стандартные утеплители. Однако недостатком ВИП является высокая стоимость и труднодоступность на территории России.

2.2.1.2 Сейсмическая аппаратура

Вопросы организации сейсмического мониторинга для решения различных задач в значительной мере подобны. Создается сейсмическая сеть, в основе работы которой лежит: регистрация сейсмическими датчиками сигналов природного и техногенного характера, их оцифровка, передача данных на локальный компьютер, хранение и дальнейшая передача в центральный пункт сбора и обработки данных для их анализа (*Havskov, Alguacil, 2004*). Различия заключаются лишь в масштабах изучаемых явлений, что отражается на типе создаваемой сети (телесейсмическая, региональная или локальная) и на типе используемой сейсмической аппаратуры.

Регистрирующая аппаратура подбирается исходя из задач сейсмического мониторинга. К примеру, при организации локальной сейсмической сети, как правило, используются более короткопериодные датчики, т.к. частоты локальных слабых событий

более высокие. При организации региональной сети желательно предусмотреть создание сейсмической одиночных пунктах регистрации группы, а В устанавливать широкополосные датчики. В настоящее время фирмы по разработке сейсмической аппаратуры предоставляют возможность одновременно оцифровывать сигнал с различными частотами опроса. Это делает возможным получение с одного датчика потоков данных с различными частотными диапазонами, предлагая, к примеру, вести регистрацию сигнала параллельно при 20 отс/с, 50 отс/с, 100 отс/с или закладывать высокую частоту с последующей децимацией.

В российских сейсмологических сетях широко применяется сейсмическая аппаратура отечественного производства, но при подборе аппаратуры для арктических условий опираются на зарубежных производителей, таких как Nanometrics, Kinemetrics, в меньшей степени Guralp Systems Limited (Данилов и др., 2013). Одной из причин такого выбора является соответствие высоким требованиям, предъявляемым к аппаратуре для установки в арктических условиях. Ниже приведены основные требования, предъявляемые нами к сейсмической аппаратуре (датчикам и регистраторам), устанавливаемой на территории Крайнего Севера:

- удобство транспортировки;

 технологичность и простота в эксплуатации (возможность обучения местного персонала работе с аппаратурой без специализированных знаний);

 возможность делать резервную копию данных на внутренний носитель информации датчика или регистратора;

- малое энергопотребление;

 возможность удаленного управления аппаратурой (настройка, перезагрузка, получение отчетов о состоянии датчика, скачивание данных с внутреннего носителя информации).

2.2.1.3 Передача данных

При установке аналогового сейсмометра регистратор размещают рядом с ним или на небольшом расстоянии, в зависимости от характеристик аппаратуры, при больших расстояниях возможно искажение сигнала и появление дополнительных шумов. Наиболее оптимальным и надежным вариантом является передача оцифрованных данных. Передача данных с регистратора непосредственно в центр сбора и обработки информации может осуществляться при помощи сотовых сетей (а именно 2G/3G/4G модемов). Однако это не

всегда оправдано в силу неустойчивости связи и малой зоны покрытия сотовых сетей на территориях Европейского Севера России.

Итак, оцифрованные данные с регистратора в центр сбора данных (на локальный компьютер) могут быть переданы при помощи: проводов, оптоволокна или беспроводных каналов связи. Для этого, как правило, используются стандартные средства, предлагаемые производителем аппаратуры. В случае передачи данных на расстояния большие, чем позволяет стандартный интерфейс, необходимо применять дополнительные или другие (встроенные) интерфейсы. В зависимости от комплектации регистратора, это могут быть Wi-Fi и/или Ethernet, либо дополнительные внешние устройства (преобразователи сигналов (таблицы 2.6, 2.7)). На коротких расстояниях (до 20 м) можно использовать интерфейс RS-232, на расстояниях до 100 м – Ethernet 100BASE-T, свыше 100 м – специализированные преобразователи, представленные в таблице 2.6.

Использование беспроводных каналов связи является наиболее удобным способом передачи данных с регистратора на компьютер. Однако в случае сбоя в работе оборудования или сильных помех (например, обусловленных погодными условиями) может произойти потеря сигнала. Поэтому если условия установки позволяют проложить проводную линию, то лучше использовать ее. В связи со сложностью монтажа оптических линий, а также необходимостью привлечения специализированной техники, что автоматически повышает трудозатраты, наиболее доступным и удобным для арктических широт является использование интерфейсов RS-485 или RS-422 (Данилов и др., 2013). Интерфейс RS-485 в отличие от RS-422 на линии может иметь несколько приемопередатчиков (до 32), а в остальном они схожи, то рассмотрим пример с его использованием. Сигнал от регистратора из интерфейса RS-232 преобразуется в интерфейс RS-485, который без потерь передается на 1200 м (таблица 2.6).

При необходимости передачи данных на большие расстояния используются повторители интерфейса. Следующим шагом является преобразование интерфейса RS-485 для подключения к центру сбора данных (компьютер). В этом случае используются преобразователи интерфейсов или медиа-конверторы, основные типы которых представлены в таблице 2.7. Для подключения компьютера к Wi-Fi сети он должен быть оснащен соответствующим модулем. Связь компьютера с регистратором осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения. Так, при использовании аппаратуры фирмы Guralp для формирования файлов с сейсмическими записями и их визуализации на компьютере используется программа "Scream!" (*Guralp Systems..., 2014*).

Интерфейс передачи данных	Пр	еобразователь сигналов	Дальность передачи на одном сегменте линии, м	Возможность дуплексной передачи данных	Простота монтажа/ цена (USD)	Рабочий диапазон температур, °С	Источник	
	MOXA TO	CC-100I		+	+/121	-20+60		
RS-485	OBEH AC	3-M	1200	_	+/55	-20+75		
105 105	НИЛ АП М	NL-232C	1200	+	+/95	-40+70		
	ICP DAS I	-7520AR		_	+/70	-25+75	1	
	MOXA TO	CC-100I		+	+/121	-20+60		
RS-422	Korenix Je	tCon 2201iw	1200	+	+/100	-40+70		
	Advantech	ADAM-4522	<u>1 </u>	+	+/71	-10+70		
	МОХА ТС оптоволок	СF-142-S-ST-T (одномодовое то)	40000	+	-/428	-40+75	(Интеллектуаль ные 2013)	
Оптоволокно	Korenix Je оптоволок	tCon 2401m (многомодовое но)	5000	+	-/138	-20+70		
	Advantech ADAM-4541 (многомодовое оптоволокно)		2500	+	-/214	-10+70		
	Преобраз ователи	VSCom NetCom 123 WLAN	Зависит от	+	+/258	0+60		
		MOXA NPort W2150A-T	антенны	+	+/493	-40+74		
Радиоканал Wi-Fi	Антенны	Антенна HiTE Wi-Fi-19	До 3000	+	-/112	-30+70	(Wi-Fi оборудование для организации, 2013)	
		Антенна D-Link ANT24-2100	До 10000	+	-/283	-40+70	(Wi-Fi оборудование, 2013)	

Таблица 2.6 – Варианты передачи данных с использованием различных интерфейсов

Интерфейс	Конвертация	Преобразователь сигналов	Дуплексная	Простота
передачи данных	сигнала		передача данных	монтажа/цена (USD)
Интерфейс RS-485	B USB	OBEH AC4	—	+/59
		MOXA UPort 1150	+	+/89
		Kron TUSB-485 GS V12	—	+/70
Интерфейс RS-485	B Ethernet	Advantech ADAM-4571	+	+/179
		VSCom NetCom 113 Din Rail	+	+/127
		MOXA NPort 5130	+	+/135
Оптоволокно		Advantech EKI-2541M-AE	+	-/156
		(многомодовое оптоволокно)		
		MOXA IMC-21-M-SC	+	-/182
		(многомодовое оптоволокно)		
		MOXA IMC-21-S-SC	+	-/271
		(одномодовое оптоволокно)		
		Korenix JetCon 1301-m	+	-/88
		(многомодовое оптоволокно)		
		Korenix JetCon 1301-s	+	-/138
		(одномодовое оптоволокно)		

Таблица 2.7 – Типы преобразователей сигналов для подключения к компьютеру
Кабель для передачи данных подбирается исходя из условий, в которых он будет использоваться. Если кабель будет применяться для наружной прокладки или прокладки в грунте необходимо учесть в его характеристиках водонепроницаемость, реакцию на воздействие УФ излучения и устойчивость к внешней агрессивной среде.

В общем случае для наружной прокладки кабель должен иметь:

- бронированное покрытие (для защиты от механических повреждений);
- экранирование во избежание влияния внешних полей на сигнал;
- изоляцию из полиуретана;
- необходимый рабочий диапазон температур.

В таблице 2.8 приведены основные марки кабелей, учитывающие выполнение этих требований. Выбор сечения и количество пар жил кабеля зависит от решаемых задач. В зависимости от условий района установки сейсмической станции и наличия инфраструктуры кабель прокладывается по кабельным каналам, земной поверхности, в грунте или подвешивается на специальные стойки. При прокладке в грунте, в местах проезда транспортных средств, кабель необходимо дополнительно защитить, проложив его в трубе нужного диаметра. В качестве дополнительной защиты кабеля можно использовать металлическую гофру.

В обрабатывающий центр данные могут передаваться с использованием спутниковой связи, Интернета или почтовой связи, в зависимости от имеющейся инфраструктуры в районе установки пункта сейсмических наблюдений. Если связь отсутствует, то оператор переписывает данные на съемный носитель и отправляет в центр обработки данных любым доступным способом.

Передача данных с использованием спутниковых систем весьма удобна, однако высокая стоимость услуг ограничивает возможность ее применения. Использование средств Интернета для передачи данных осуществляется при помощи специального оборудования и программного обеспечения от провайдера (к примеру, 3G модемы), либо при помощи стандартных программных и аппаратных средств компьютеров. В обрабатывающий центр данные поступают как on-line, так и в режиме, близком к реальному времени, в виде архивированных пакетов, в зависимости от возможностей интернет-канала.

Маркировка кабеля	Количество пар жил (оптических волокон)/сечени е жилы (мм ²)	Броня/экр ан	Рабочий диапазон температу р, °С	Возможно сть прокладки в земле/ удобство монтажа	Масса кабеля длиной 1 км, кг	Источник
	To	копроводяц	цая жила из м	меди	•	
Герда КПсК	2/1.5	+/+	-50+70	+/+	475	
Герда КВИП	2/1.5	+/+	-50+80	+/+	409	(Герда,
Герда КУИН	2/1.5	+/+	-50+80	+/+	438	2013)
П-270	2/9.2	+/+	-40+55	+/+	240	(Кабельно-
П-269	3/2	_/+	-40+55	+/+	226	проводник овая
П-296	2/0.86	_/+	-50+55	+/+	200	продукция , 2013)
ПТРК	10/2	_/+	-50+55	+/+		(Кабель ПТРК, 2017)
		Оптическ	кое волокно			
Герда КОУ- ТК	1.212	+	-40+50	+/	От 215	(Герда, 2013)
ОКБ-П	2.4144	+	-40+60	+/	От 299	(Велком-
ОКБ-Т	2.448	+	-40+60	+/	От 188	Сибирь,
ОКБс	2.448	+	-60+70	+/	От 196	2013)
ОМЗКГЦ	8.1048	+	-40+70	+/	От 167	(Компания
ОМЗКГМ	8.1048	+	-40+70	+/	От 276	, 2013)

Таблица 2.8 – Некоторые марки кабелей и их характеристики

2.2.1.4 Обеспечение электроснабжения сейсмического бункера

Основные требования к кабелям для обеспечения электроснабжения такие же, как и для кабелей передачи данных: влагостойкость, устойчивость к механическим и УФ воздействиям. В некоторых случаях передача данных и электричества может осуществляться по одному кабелю при наличии достаточного количества жил и отсутствии помех на передачу данных. При отсутствии инфраструктуры энергоснабжение сейсмического сооружения осуществляется при помощи автономных систем (AC). В настоящее время имеются различные реализации AC основанные как на двигателях внутреннего сгорания, так и на альтернативных источниках энергии: ветрогенераторы, солнечные батареи (*Tunы..., 2013*).

К преимуществам автономных систем бесперебойного питания, организованных при помощи двигателей внутреннего сгорания, можно отнести лишь их сравнительно невысокую стоимость. Недостатками являются: высокий уровень шума, короткий рабочий ресурс и сложность технического обслуживания.

Системы бесперебойного питания организованные на основе альтернативных источников энергии полностью автономны и не требуют каких-либо топливных затрат. К их недостаткам можно отнести высокую стоимость, зависимость от метеоусловий, в ряде случаев проведение охранных мероприятий, а также сложность монтажа.

Энергообеспечение пункта сейсмических наблюдений может быть осуществлено, к примеру, и за счет только аккумуляторных батарей большой емкости (порядка 200 А*ч). При их выборе следует отдавать предпочтение батареям, изготовленным на основе технологии AGM или на основе гелевого электролита, т.к. они обладают широким температурным диапазоном и устойчивы к глубокому разряду. Из недостатков можно указать более высокую цену в сравнении с аналогами на основе жидких электролитов, а также необходимость замены аккумуляторов на аналогичные в составе батареи.

В общем случае выбор той или иной схемы электроснабжения всегда определяется решаемыми задачами, имеющимся финансированием и условиями района установки пункта сейсмических наблюдений.

Таким образом, представлена схема организации пункта сейсмических наблюдений в арктических условиях. По вышеизложенной схеме было открыто четыре пункта сейсмических наблюдений в Арктике («Амдерма» (2011) в п. Амдерма НАО, «Земля Франца-Иосифа» (2011) и «Омега» (2014) на о. Земля Александры архипелага Земля Франца-Иосифа, «Северная Земля» (2016) на о. Большевик архипелага Северная Земля, входящих в состав АСС), что позволило практически полностью охватить восточную часть Западного арктического сектора РФ (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Конфигурация УНУ «Архангельская сейсмическая сеть» на 2018 г.

2.3 Технико-методические приемы построения комплексной системы сейсмического мониторинга

Технико-методические приемы по построению комплексной системы сейсмического мониторинга рассмотрим на примере мониторинга гидротехнических сооружений (ГТС) и районов их размещения. Функционирование гидроэлектростанций (ГЭС) связано с возможностью появления и развития опасных процессов, которые проявляются на сооружении в изменении состояния плотины, нарушении работы турбин и пр. Аварии на ГЭС наносят большой ущерб, поэтому их оборудуют несколькими видами систем мониторинга с методиками наблюдения разных типов. В идеале все сведения должны быть объединены (например, как в (*Рубин, Соболев, 2017*)), но в настоящее время наблюдается организация отдельных баз данных для разных видов наблюдений, которые соприкасаются крайне редко. Как правило, каждый вид мониторинга вырабатывает свои допустимые границы контролируемых параметров, внутри которых гарантируется безопасная работа (*ГОСТ P 22.1.11-2002 и РД 34.31.303-96*).

Такой подход применения не связанных между собой методов мониторинга имеет много недостатков. Главным является тот, что каждая применяемая методика требует свой тип датчиков, свою специфику сбора данных и временной ритм снятия показаний. Результатом являются серьезные недостатки построения сети мониторинга, в том числе:

1) излишне большое количество датчиков, часто дублирующих измерения, но с разной точностью;

2) разный временной интервал между замерами, не позволяющий наблюдать временной ход с нужной детальностью;

3) искусственное ограничение потоков данных, определяемое требованиями применяемых методик.

Наиболее наглядно эти недостатки иллюстрирует тот факт, что систему безопасности ГЭС обслуживают три вида сетей мониторинга, основанных на регистрации механических колебаний:

1) сейсмологические наблюдения в верхнем и нижнем бьефе ГЭС;

2) сейсмометрические наблюдения на плотине;

3) система виброконтроля работы агрегатов.

Этот принцип трех видов наблюдений закреплен в российских нормах (*PД* 34.20.501-95) и за рубежом, например в (ANSI S2.47-1990). Причиной такого подхода является наследие эпохи аналогового или аналого-цифрового сбора данных, что не позволяло использовать все возможности датчиков. По существу, единое поле колебаний, присутствующее в точке наблюдений, искусственно разделяется по частотному диапазону и по типам сигналов на землетрясения, колебания плотины и вибрации турбины и/или ее частей.

Рассмотрим более подробно требования, предъявляемые к аппаратурному оснащению каждого вида сети мониторинга с целью выяснить положительные и отрицательные возможности.

2.3.1 Сейсмологические наблюдения района размещения плотины

Цель – получение информации в первую очередь о региональных землетрясениях (время, координаты, магнитуда). Эти сведения необходимы как для расчета воздействия на плотину, так и для оценки сейсмического режима, в том числе для выявления наведенной сейсмичности. Ранее учитывались относительно сильные события (ML>3.5), в последние десятилетия сведения о сейсмическом режиме успешно дополняются данными о микросейсмах (*Юдахин и др., 2005*) и микроимпульсах (ML<0) (*Спунгин и др., 1997*). Таким образом, обобщая опыт (*Simson et al. 1988; Савич и др., 1990; Kirkegaard & Brincker 1994; РД 34.20.501-95; Руководство... 2001; Gupta 2002; Mivehchi et al. 2003; Kanycmян, Юдахин, 2007; Gupta and Rastogi 2013*), получаем следующие требования к аппаратуре:

1) датчики – трехкомпонентные сейсмометры преимущественно велосиметры, полоса регистрируемых частот 0.1-25 Гц. Ориентация горизонтальных компонент – по сторонам света (N-S, E-W). Как правило, для решения поставленных задач нет необходимости регистрации только сильных событий, поэтому подбирают датчики с динамическим диапазоном не ниже 130 дБ. Существенным для метода является стабильность во времени характеристик датчика и линейность АЧХ в области частот до десятых долей Гц, т.к. при обработке данных используются не только вступления волн, но и их амплитуды и спектры.

2) сбор и передача данных – согласуется с датчиком, т.е. динамический диапазон не ниже 130 дБ при 50 отс/с. Учитывая, что могут использоваться датчики с аналоговым выходом (как, например, показано ниже) с уровнем сигнала десятки мкВ, усилитель и/или АЦП должны располагаться непосредственно вблизи датчика. Регистрация – непрерывная, т.е. поток данных с трех сейсмических компонент составляет 4800 бит/с. Данные могут передаваться в единый пункт сбора и/или сохраняться на месте. Количество пунктов в системе – не менее 3, удаленность точек от плотины – примерно до 30 км. Существенным вопросом является точность привязки данных к абсолютному времени. Как отмечалось выше, многие регистраторы обеспечивают точность от 1 до 20 мкс.

2.3.2 Сейсмометрические наблюдения на плотине

Цель – оценка напряженно-деформированного состояния плотины, выявление ослабленных зон в теле плотины и в бортовых примыканиях. В зависимости от задач и нормативных требований разных стран применяется два основных метода исследований: расчет спектра реакции сооружения на достаточно сильное воздействие (землетрясения или искусственного источника) (*Ibrahim & Mikulcik*, 1977; *Fenves et al.*, 1992; *Loh & Tsu-Shiu*, 1996; *Daniell & Taylor*, 1999; *Chuhan et al.*, 2009) и выявление форм собственных колебаний плотины при воздействии микросейсм (*Darbre & Proulx*, 2002; *Патент 2515130*; *Antonovskaya et al.*, 2014; *Еманов и др.*, 2017 и др.). В первом случае в основном ведутся стационарные наблюдения, во втором – обследования передвижными расстановками. Стационарно на плотине устанавливаются датчики, объединенные в единую сеть, при передвижных наблюдениях используют схему со стационарной точкой и несколькими станциями, перемещаемыми по плотине.

Обобщая литературные сведения, получаем следующие требования к аппаратуре:

1) датчики – для стационарных наблюдений с возможностью регистрации сильных движений могут использоваться короткопериодные датчики (0.5–25 Гц) с динамическим диапазоном от 124 дБ и выше. Для передвижных расстановок с регистрацией микросейсм подойдут короткопериодные датчики (0.5-50 Гц), но динамический диапазон должен быть не ниже 130 дБ для возможной полноценной записи микросейсм и выделения собственных колебаний плотины. В обоих случаях могут использоваться как велосиметры, так и акселерометры. Датчики – трехкомпонентные, но горизонтальные компоненты ориентируются по плотине – радиально и тангенциально для арочной плотины и, соответственно, вдоль и поперек для линейной.

2) сбор и передача данных – согласуется с применяемым методом. В первом случае динамический диапазон регистратора не ниже 124 дБ при 50 отс/с, регистрация непрерывная, но сохраняются события только с заданным порогом, например, задаваемым отношением STA/LTA (*Trnkoczy, 2002*). Точность привязки к абсолютному времени (UTC) – как в сейсмологических наблюдениях. Во втором случае при наблюдении собственных колебаний плотины и/или при воздействии микросейсмического шума динамический диапазон не ниже 130 дБ при 100 отс/с для обеспечения регистрации высокочастотных собственных колебаний, длительность непрерывной регистрации в точке – от минут до часов. Сбор данных осуществляется либо на внутреннюю память датчика, либо по LAN на центральный компьютер сбора данных. Привязка записи к точному времени при работе в

теле плотины требует специальных мероприятий, т.к. приходится либо выносить антенну GPS из сооружения или работать по внутреннему таймеру.

2.3.3 Виброконтроль работы гидроагрегата

Цель – оперативное выявление вибраций турбины (гидроагрегата), грозящих аварией. Контролируется уровень механических вибраций для набора точек на турбине, при превышении которого останавливается работа (*Трунин, Скворцов, 2010*). По нормативам, принятым в России (*РД 34.20.501-95*), датчики виброконтроля объединяются в отдельную сеть, связанную с системой автоматизированного управления работой ГЭС.

Датчиков десятки штук на агрегат, но существует ряд явлений, ими не охваченных. Например, система виброконтроля самостоятельно не может определить без привлечения внешних данных, связан ли аномальный по амплитуде сигнал с землетрясением, пуском соседнего агрегата или с неисправностью самого гидроагрегата. Другой важный вопрос для безопасности работы турбины – выявление моментов образования кавитационного жгута в турбине. Это явление сейчас контролируется датчиком давления, закрепляемом на отводящей камере (*Xu Zhenyu et al. 2015*). Обработка получаемых данных сводится к выявлению аномальных всплесков амплитуд давления, но данные зашумлены другими процессами. Для уверенного обнаружения явления желательно привлечение данных с датчиков, являющимися внешними для гидроагрегата и другого типа измерений, например, данные сейсмических датчиков на плотине. Ниже рассмотрена такая возможность.

В таблице 2.9 сведены основные требования к аппаратуре и способам сбора данных для сейсмических сетей при мониторинге ГЭС. Анализ таблицы показывает, что первые два типа мониторинга могут быть объединены в единую наблюдательную сеть, которая дает возможность также решать часть задач третьего типа – виброконтроля работы агрегатов. Использование широкого частотного и динамического диапазонов сейсмической регистрации позволяет вести одновременное наблюдение разных полей сейсмических сигналов, указанных в таблице 2.1.

Тип мониторинга	Изучаемый объект	Динамический диапазон датчика, дБ	Динамический диапазон регистратора, дБ	Полоса частот регистрируем ого сигнала, Гц	Точность привязки регистрат ора к UTC, мкс
Сейсмологи- ческий	Землетрясе- ния	>130	>130 при 50 отсчет/с	0.2-25	1-20
Сейсмометри-	Сильные движения	>124	>124 при 50 отсчет/с	0.5-25	1-20
ческий мониторинг	Микросей- смический шум	>130	>130 при 100 отсчет/с	0.5-50	1-20
Виброконтроль	Пульсации давления	>130	>100 при 200 отсчет/с	1-100	20
гидроагрегата	Вибрация агрегата	>130	>130 при 200 отсчет/с	1-100	1

Таблица 2.9 – Основные требования к сейсмическим сетям для мониторинга

2.3.4 Система мониторинга нового поколения

Датчики. Для реализации указанных выше задач необходимо использование высокочувствительной сейсмической аппаратуры, построенной на базе маятников с обратной связью на принципе баланса сил. Данный вид аппаратуры гарантирует высокую стабильность динамических характеристик (амплитуда, частота) при изменении температуры, которая в целом отражается на регистрируемых параметрах, резкое увеличение которой, как и изменение собственных частот колебаний сооружения, является критерием оценки целостности объекта. С этой позиции использование пьезодатчиков представляется малоэффективным в силу нелинейности АЧХ и высоких собственных шумов датчика, что позволяет применять на ГТС их только для регистрации сильных событий – землетрясений с магнитудой >3.5. Ограниченные возможности пьезодатчиков определяют и невысокие требования к регистраторам.

Пример низкой чувствительности стандартно используемых пьезодатчиков и регистраторов в автоматизированной системе сейсмометрического контроля (АССК) показан на рисунках 2.11 и 2.12. Материалы взяты из презентации сотрудников ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», филиал ОАО «РусГидро»-«Бурейская ГЭС» на тему «Применение на ГЭС современных инженерно-сейсмометрических и инженерно-сейсмологических систем мониторинга». На рисунке 2.11 приведен пример регистрации системой АССК Бурейской ГЭС сильного землетрясения Юго-Восточной Сибири, произошедшего 14.10.2011, t0=06:10:12, lat 54.04 lon 123.77, h=15 км, mb=5.9 (http://www.ceme.gsras.ru). Видно, что система АССК уверено зарегистрировала это

событие, как и система локальной сейсмологической сети (ЛСС), установленной в районе размещения плотины.



Рисунок 2.11 – Пример регистрации землетрясения Юго-Восточной Сибири (14.10.2011, t0=06:10:12, lat 54.04 lon 123.77, mb=5.9) системой мониторинга Бурейской ГЭС с сопоставлением с результатами локальной сейсмологической сети

c29 cr. 10 Z	5 2 6 7 7 10 2 3 3 4 5 5 7 7 10 2 3 5 точка № 1 секция 16 оти 151
Левый берег 0 09:16:20 09:16:30 09:16:40 09:16:50 с-29	Точка № 11 секция 16 отм. 256
Га Ка Ка Ка Ка Ка Ка Ка Ка Ка К	точка № 13 секция 21 отм. 256 ЛСС "Талакан"
0 09:16:20 09:16:30 09:16:40 09:16:50 c-29	Бурейская ГЭС
	ЛСС "Плотина"
ст. 4 Z отм. 315 0 09.16.20 09.16.30 09.16.40 09.16.50	ЛСС "Чеугда"

Рисунок 2.12 – Пример регистрации местного землетрясения система мониторинга, установленных в теле плотин Чиркейской ГЭС (слева) и Бурейской ГЭС (справа), для Бурейской ГЭС приведено сопоставление с результатами локальной сейсмологической сети

Другой пример (рисунок 2.12) демонстрирует записи регистрации местного землетрясения системами, установленными в теле плотин Чиркейской ГЭС (левая часть

рисунка 2.12) и Бурейской ГЭС (правая часть рисунка 2.12). Для Бурейской ГЭС приведено сопоставление с ЛСС. Видно, что землетрясение было уверенно зарегистрировано датчиками ЛСС, но не датчиками АССК в силу их низкой чувствительности. При этом на Чиркейской ГЭС, на которой установлены самые «простые» сейсмологические датчики СМ-3КВ, система «увидела» местное землетрясение, которое можно наблюдать даже без применения специализированных фильтров.

Отметим, что слабые (низкомагнитудные) землетрясения происходят значительно чаще, чем сильные, т.е. их можно использовать как дополнительный независимый внешний источник для оценки состояния плотины, выявляя ослабленные области и концентрируя в них внимание при наличии негативного развития процесса (подробнее см. в гл. 4). Применение пьезодатчиков и соответствующих регистраторов, по-существу, «обрезает» такую возможность.

Анализ представленных таблиц 2.3 и 2.4 показывает, что использование датчиков, применяемых стандартно для сети сейсмологического мониторинга, позволяет не только зарегистрировать землетрясения, но и выделить собственные частоты сооружения и основные обертоны работы гидроагрегатов, в том числе надежно определить их амплитуду. В качестве примера приведем записи колебаний системы мониторинга Чиркейской ГЭС. Подборка записей рисунка 2.13, показывает, что собственные колебания плотины видны даже «невооруженным глазом», уж не говоря о стандартной сейсмологической фильтрации (красная кривая).



синяя линия – без фильтрации, красная – сейсмологический фильтр высоких частот

Рисунок 2.13 – Подборка записей в точках вдоль галереи на отм. 315 Чиркейской ГЭС, полученных системой сейсмовибрационного мониторинга

Среди существующих разработок, удовлетворяющих вышеперечисленным требованиям, отметим импортные датчики и регистраторы таких фирм, как Guralp Systems Limited (Великобритания), GeoSIG Ltd (Швейцария), Nanometrics Inc. (Канада) и отечественные сейсмоприемники СМЗ-КВ (Аппаратура и методика..., 1974). Высокая стоимость сейсмометров зарубежных фирм-производителей относительно пьезодатчиков оправдывается стабильностью АЧХ с течением времени, практически пожизненным сроком эксплуатации и реализацией различных подходов по обработке данных, современной сейсмологии. Речь идет об аналоговых датчиках, ситуация с регистраторами сложнее. Существенно, что регистраторов, обеспечивающих выполнение приведенных выше требований, особенно по точности привязки ко времени, и объединяемых оптоволоконной сетью, в мировой практике очень мало. Следствием этого, а также с учетом финансовой составляющей, стала отечественная разработка регистратора и программы сбора данных (Antonovskaya et al, 2016), подробнее в п. 2.3.4.3.

Идеи по объединению различных систем мониторинга и типов обработки данных уже реализуются как в отечественной практике, например (*Золотухин и др., 2013; Antonovskaya et al, 2016*), так и в мире (*RECONASS*), но для объектов гражданского строительства в сейсмоактивных районах. Тенденция создания и внедрение инновационных технологий является «здоровым» развитием общества, позволяющая вывести на новый уровень системы мониторинга, что в конечном итоге, должно привести к предотвращению ЧС и минимизации затрат по их ликвидации.

Для реализации подобных идей для гидротехнических сооружений (ГТС) важно, что это не должно быть простым объединением потоков данных с созданием соответствующих конверторов для каждого типа датчиков. Вместо этого необходимо создать сеть на новых принципах регистрации и сбора данных. И одним из важных критериев являются технические характеристики и единообразие используемой аппаратуры для всех видов сейсмомониторинга, а также единовременность регистрации сигнала со всех датчиков.

2.3.4.1 Требования к системе сейсмического мониторинга и основные принципы построения сети

Аварии на гидротехнических сооружениях являются показателями того, что сложившаяся система контроля их состояния имеет ряд недостатков, которые можно разделить на группы. Это, во-первых, неполнота представлений о процессах, происходящих в объектах, и об явлениях, воздействующих на них. Во-вторых, несоответствие разрешающей способности регистрирующей сейсмической аппаратуры

решаемым задачам. Для устранения этих недостатков современная сейсмология располагает обширным комплексом аппаратурно-методических решений, которые были не доступны 20 лет назад из-за отсутствия надлежащей высокочувствительной цифровой аппаратурной базы. Все это позволяет предъявить новые требования к системам сейсмического мониторинга ГТС (*Antonovskaya et al.*, 2016):

 осуществлять контроль состояния плотины и грунтов основания с использованием единого типа аппаратуры;

- обнаруживать на ранней стадии опасные гидродинамические явления;

выделять события разной силы и природы (землетрясения, пуски гидроагрегатов и пр.);

– осуществлять: непрерывный сбор данных в реальном времени в единый центр сбора и хранения данных, оперативный просмотр и построение оценок (спектров, выделение событий по алгоритму STA/LTA (*Trnkoczy*, 2002)), содержать встроенные программы обработки в реальном времени, включать функции контроля работы системы и калибровки датчиков из центрального пункта;

– реализовывать привязку всех каналов к единому времени (UTC) с точностью 1 20 мкс для применения корреляционных методов обработки;

 не содержать принципиальных ограничений на расположение датчиков (удаленность от центрального пункта до 20-30 км, помещение точек внутри плотины, в машинном зале, помехозащищенность).

2.3.4.2 Сбор данных, привязка по времени

При наблюдениях собственных колебаний плотины системой сейсмического мониторинга важен контроль сдвига фаз записей в разных точках. Для этого необходима жесткая привязка к единому приемнику точного времени всех пунктов мониторинга (локальная привязка). Отметим, что подобное требование существует при создании сейсмических групп (seismic array) (*Havskov, Alguacil, 2004*). Относительная точность синхронизации должна быть, по крайней мере, на один порядок лучше, чем для отдельных станций. Таким образом, предпочтительна центральная система записи с уникальной временной базой. Для seismic array предложено несколько вариантов реализации этого вопроса в (*Havskov, Alguacil, 2004*), но для создания подобных систем в специфических условиях на сооружениях наилучшим образом по нашему мнению подойдет следующий вариант.

Шаг квантования по времени точно синхронизируется у всех датчиков с помощью передачи импульсов от центральной системы точного времени с помощью автоматической фазовой подстройки частоты генератора (PLL – phase-locked loop), встроенного в регистраторы. Центральный блок может, например, послать 1 PPS (Pulse Per Second) и все регистраторы примут их отсчеты одновременно. Использование современных микропроцессоров, в которых уже заложен стандарт IEEE 1588, позволяет осуществлять привязку точного времени через Ethernet с микросекундной точностью. К тому же отпадает вопрос с прокладкой многочисленных кабелей для передачи цифровых данных и данных времени с развитием оптоволоконной индустрии – задействовать один кабель. Этот наиважнейший вопрос, как правило, опускается при описаниях систем мониторинга ответственных объектов (например, разработка КТИ ВТ СО РАН).

2.3.4.3 Регистратор сейсмических сигналов ADAS3

Реализацией отмеченных выше требований является созданный по нашему техзаданию регистратор сейсмических сигналов ADAS3 (*TУ 4314-71332728-003-2013*), предназначенный для сбора данных с сейсмических датчиков и их передачи по сети Ethernet в стандарте 100BASE-T (передача по медной витой паре) или 100BASE-FX WDM (передача по одномодовому оптическому волокну).

Регистраторы ADAS3 могут быть использованы для распределенной сети измерения сейсмических и вибрационных воздействий на крупные сооружения и здания, для создания сейсмических антенн (seismic array), а также для других применений, где требуется сбор данных измерений с удаленных датчиков с жесткой привязкой времени.

Регистраторы имеют три аналоговых входа подключения датчиков. Мастер времени -GPS модуль с высокостабильным VCXO генератором с частотой 10 МГц и выходом секундных импульсов. Для синхронизации потока измеренных данных используется технология привязки времени по сети Ethernet PTP по стандарту IEEE 1588 v.1. Внешний вид регистратора ADAS3 представлен на рисунке 2.14.

Обмен информацией с центром обработки данных осуществляется по одномодовой оптоволоконной линии с использованием стандарта 100BASE-FX WDM. Длина волокна может превышать 20 км. Аналоговый интерфейс содержит три дельта-сигма-АЦП с малошумящим (5нB/Гц^{1/2}) программируемым усилителем. АЦП обладает чрезвычайно высоким разрешением в 130 дБ SNR (отношение сигнал/шум) и линейностью с -122 дБ THD. Такие параметры позволяют регистрировать сигналы в широком частотном диапазоне (0-250 Гц) без переключения усиления входного усилителя. Можно выбрать две

скорости преобразования: 250 и 1000 отс/с. Для данного АЦП частота 250 отс/с минимальна.



Рисунок 2.14 – Регистратор сейсмических сигналов ADAS3 в виде печатной платы (слева) и вариант размещения (справа)

Реализованный динамический диапазон системы сейсмомониторинга позволяет выделить на сейсмограммах местное землетрясение и пуск гидроагрегата в различных пунктах регистрации: на плотине, береговых примыканиях и в машзале, особенно после применения фильтрации для выделения землетрясения в машзале (рисунок 2.15).



Рисунок 2.15 – Возможности выделения и разделения сигналов разной природы

В дополнении к регистратору ADAS3 было разработано программное обеспечение, которое позволяет анализировать данные по решению следующих задач:

1. мониторинг вибраций турбин, в том числе дополнительный контроль работы ГА и выявление потенциально опасных ситуаций;

2. просвечивание тела плотины и бортовых примыканий с использованием сигналов:

- механических вибраций при работе турбин (оборотная и двойная оборотная частоты),

- пусков и остановок турбин;

3. наблюдение собственных колебаний плотины, мониторинг изменения собственных частот и амплитуд, сравнение с расчетной моделью, выделение зон изменения свойств;

4. регистрация сейсмических событий разной природы – землетрясения – от телесейсмических до локальных, взрывы – местные и отдаленные ядреные (Северная Корея), пуски агрегатов;

5. регистрация потоков микротресков, свидетельствующих об изменении напряженно-деформированного состояния швов плотины, массивов бортов или зон сочленения плотины с бортами;

6. осуществление калибровки канала датчика без демонтажа оборудования;

7. выполнение автоматического выделения событий (алгоритм STA/LTA), занесение информации в базу данных, оценка уровней вибрации на выбранных частотах.

На рисунках 2.16 – 2.17 показаны основные программные окна программ, входящих в вычислительный комплекс.



Рисунок 2.16 – Программа просмотра и обработки данных сейсмических событий Event View



Рисунок 2.17 – Функциональные окна программы сбора данных Dam Observer

2.3.5 Обзор пространственно-временных систем наблюдения: схем расстановки датчиков и периодичность снятия показаний

Для выявления наиболее эффективных приемов наблюдения, в том числе для сейсмологических, был выполнен обзор существующих наработок. Согласно *(СТО 70238424.27.140.032-2009)* типовая методика сейсмологических наблюдений предусматривает площадную регистрацию на локальной сети, включающей минимум 3–4 сейсмические станции. Сеть должна покрывать территорию расположения ГТС, примыкающую часть ложа водохранилища и нижний бьеф.

При типовых сейсмометрических наблюдениях сейсмические датчики (трёхкомпонентные сейсмографы, велосиметры и акселерометры) следует размещать в теле ГТС и в основании сооружения. Измерения необходимо выполнять в нескольких важных сечениях сооружения и на различных его отметках (на поверхности основания, в средней по высоте части сооружения и на гребне – на поверхности). Рассмотрим ряд примеров реализации вышесказанных идей и возможности объединения различных схем мониторинга.

В общем виде рекомендации по выбору точек наблюдения на плотинах приведены в paботе «Strong-motion instrumentation of dams» (*Darbre, 1995*). На рисунке 2.18 воспроизведен рисунок из этой работы – размещение датчиков на арочной плотине. Буквами на рисунке обозначены:

 А – Минимально необходимый комплект датчиков для контроля параметров входного воздействия и отклика плотины;

В – Дополнительные датчики для контроля параметров входного воздействия и отклика плотины;

С – Опорный датчик на расстоянии примерно двукратной высоты плотины;

D – Дополнительные датчики для контроля параметров входного воздействия;

Е – Дополнительный датчик детализации отклика плотины;

F – Датчики для определения распространения сейсмической волны;

G – Дополнительные датчики для дополнительной детализации параметров входного воздействия.



Рисунок 0.18 – Размещение датчиков на арочной плотине

Как пример, приведем реализацию данной схемы расстановки датчиков на 250 метровой плотине на озере Мовуазен, Швейцария (*Proulx, Darbre, Kamileris, 2004*) (рисунок 2.19).



Рисунок 2.19 – Расположение акселерометров на плотине Mobyaseh (Proulx, Darbre, Kamileris, 2004)

В том же 1995 г. в работе (*Храпков и др., 1995*) было приведено обоснование размещение датчиков на плотине СШГЭС, совпадающее, с точностью до масштаба сооружения, с описанной схемой.

Система сейсмомониторинга Токтогульской ГЭС, Кыргызстан. На рисунке 2.20 приведена схема расстановки сейсмических датчиков (СМЗ-КВ, по три компоненты в каждом пункте) в теле плотины (Довгань, 2006). Важным решением организации системы мониторинга является то, что в «связке» с датчиками, установленными в плотине, работает пункт наблюдений, расположенный на коренных породах ущелья (в штольне) на удалении 1 км от плотины. Этот пункт является опорным для регистрации землетрясений и оценки их влияния на плотину. Недостатком является то, что система не связана с действующей локальной сетью и стандартами сейсмологических наблюдений, например, отдельно записываются Р и S –волны.



Рисунок 2.20 – Схема установки сейсмодатчиков в теле плотины Токтогульской ГЭС, Кыргызстан (Довгань, 2006)

Выбор расположения точек наблюдений в теле бетонной гравитационной плотины Токтогульской ГЭС обусловлен конструкцией самой плотины. Тело плотины состоит из трех секций – одной центральной и двух боковых, расположенных справа и слева от центральной секции, соответственно по правому и левому берегу реки (Проект...). Центральная секция отделена от боковых деформационными швами. Каждая боковая секция в свою очередь состоит из блоков, между которыми устроены деформационные швы. Обязательным условием при создании этой системы было размещение датчиков в каждой из секций, в пробке, а также в бортовых примыканиях.

Следующие примеры отражают возможности увязки воедино различных систем сейсмомониторинга.

В работах (Селезнев и др., 2012; Ивлева и др., 2016) рассматриваются преимущества комплексной обработки данных автоматизированной системы сейсмометрического контроля (АССК) и локальной сейсмологической сети (ЛСС). Приводятся примеры, показывающие, что в некоторых случаях наблюдения на удаленных сейсмостанциях могут показать более ясную картину колебаний плотины и работы ГА, чем при использовании только датчиков входящих в состав АССК. При этом необходимо учитывать, что сигналы, регистрируемые на сейсмостанциях, отличаются от сигналов зарегистрированных непосредственно на плотине не только по амплитуде, но и по спектру. Искажения могут возникать из-за наличия геологических неоднородностей, в частности резонансных слоев. На рисунке 2.21 приводятся спектры сигналов, измеренные АССК Бурейской ГЭС (*Храпков и др., 2010; 2012*) на плотине (т.04) и в машинном зале (т.15) в направлении «вдоль потока». На рисунках 2.22 и 2.23 показаны спектры сигналов, измеренных в то же время на сейсмостанциях «Чеугда» и «Пайкан» – в 13,9 км юго-запад от ГЭС.



Рисунок 0.21 – Спектры сигналов регистрируемых автоматизированной системой сейсмометрического контроля на плотине (т.04) и в машинном зале (т.15) (*Храпков и др., 2012*)



Рисунок 0.22 – Спектры сигналов регистрируемых на сейсмостанции «Чеугда» (Храпков и др., 2012)



Рисунок 2.23 – Спектры сигналов регистрируемых на сейсмостанции «Пайкан» (Храпков и др., 2012)

Анализ рисунков 2.21-2.23 показывает, что сигнал на частоте 2.1 Гц, характерный для работы ГА, достаточно уверено выделяется на сейсмических станциях ЛСС. Природа вибраций сейчас дискуссируется, предлагается несколько возможных механизмов возникновения, но они связаны с нелинейностью сложной системы агрегат-водный поток. Данный факт подтверждает возможность мониторинга работы ГА в удаленной точке. Отметим, что исходя из литературных источников, мониторинг динамических характеристик сооружения и оборудования из удаленных точек практически не ведется.

Существует мнение, что датчики для наблюдений землетрясений нельзя располагать на конструкциях, в частности в теле плотины. Основным аргументом является то, что колебания сооружения вносят искажение в сигнал. Это несомненно так, но влияние резонансных характеристик сооружения не вносит искажений во времена вступлений (в кинематическую обработку сигнала для локации события), а только в динамические параметры – в амплитуды, и то практически не в первой фазе, а проявляется в последующих фазах, как это видно из рисунка 2.12.

Рассмотрим возможность объединения трех систем сейсмомониторинга: сейсмологические наблюдения в верхнем и нижнем бьефе ГЭС; сейсмометрические наблюдения на плотине; система виброконтроля работы агрегатов. Подобная схема была реализована на Чиркейской ГЭС (рисунок 2.24).

Сейсмометры размещались по двум внутренним галереям плотины (отметки 315 м и 265 м), бортовых примыканиях, в машзалах и в 7 км на сейсмической станции Дубки (DBC, ЕГС РАН). Рисунок 2.25 показывает их расположение внутри плотины. Велосиметр и акселерометр размещены в одном пункте в центре плотины на отм. 315 м, для возможности сопоставления обоих типов данных. Центр сбора данных расположен рядом с плотиной, где также установлен GPS приемник для синхронизации времени. Все датчики и с/с «Дубки» связаны волоконно-оптическими кабелями. Состав системы сейсмологического мониторинга Чиркейской ГЭС представлен на рисунке 2.26.



сейсмологический, 2 – инженерно-сейсмометрический, 3 – виброконтроль агрегатов
Рисунок 2.24 – Система мониторинга Чиркейской ГЭС, Республика Дагестан



Рисунок 2.25 – Схема размещения сейсмического оборудования внутри плотины Чиркейской ГЭС, Республика Дагестан



1 – компьютер, 2 – мастер синхронизации PTP-GPS, 3 – коммутатор 100Base-TX, 4 – медиаконвертер 100BASE-TX по витой паре в 100BASE-FX WDM, 5 – GPS антенна, 6 – регистратор сейсмических сигналов, 7 – сейсмодатчик (может быть одного или нескольких типов, одновременно используемых в системе)

Рисунок 2.26 – Состав системы сейсмологического мониторинга Чиркейской ГЭС

Согласно таблице 2.2, полоса частот регистрируемых сигналов – от 0.1 до 100 Гц, уровни по амплитуде (приведены к ускорениям) – от единиц мкм/ c^2 до единиц м/ c^2 . Эти параметры реализуют датчики, применяемые стандартно в сейсмологической практике. Регистрация ведется по трем компонентам (X, Y, Z), горизонтальные компоненты устанавливаются по осям сооружений (на плотине – по радиусу и касательной к арке), вне гидросооружения – по странам света (как принято в сейсмологии). Допустимо во второстепенных точках в теле плотины вести регистрацию только по радиальной оси – преимущественной при колебаниях плотины.

Тестирование системы и верификация математической модели плотины может осуществляться, например, методами тестовых сигналов (см. гл. 4). Требования к повторяемости тестового сигнала невысоки, достаточно соблюдать требуемый частотный диапазон и небольшие вариации амплитуд, при обработке необходимо рассматривать пару записей источник-приемник, полученных одновременно. Исходя из этого, в качестве тестовых сигналов можно использовать широкий набор колебаний: от транспорта механические воздействия, слабые землетрясения и пр. (Золотухин и др., 2013; Нго Тхи Лы и др., 2013; Antonovskaya et. al, 2016).

Если первые системы мониторинга работали в так называемом ждущем режиме (данные из архивной базы ICOLD), то современные системы мониторинга могут осуществлять прием всего непрерывного потока данных, который может быть сохранен. Параллельно с приемом реализуется оперативная (on-line) обработка данных в разработанном программном обеспечении.

Существенно, что информация со всех датчиков может участвовать во всех перечисленных способах обработки данных, тем самым решение о состоянии объекта имеет многоуровневое подтверждение по независимым данным.

Выводы

1. Технический прогресс в приборостроении и информационных технологиях позволяет использовать один тип сейсмической аппаратуры для одновременной регистрации сейсмических сигналов разной природы (собственные частоты колебаний сооружений, землетрясения разной интенсивности и пуски гидроагрегатов, пр.) с возможностью их последующего полноценного анализа.

2. Использование единого типа сейсмической аппаратуры и новейших способов регистрации позволяет расширить сферу решаемых задач системами сейсмического мониторинга. Оснащение региональных сейсмологических сетей, широкополосными

сейсмометрами дает возможность помимо стандартного сейсмологического мониторинга проводить ряд дополнительных геофизических исследований. Так, в Архангельской сети ведется изучение строения литосферы с применением функции приемника (Ваганова, 2012). Реализация плотной сети датчиков дает основу для реализации методов сейсмической томографии и интерферометрии при изучении верхней части земной коры (Afonin et al., 2017).

3. Еще одна задача сейсмологической сети – мониторинг территории размещения объектов и состыковка с мониторингом состояния объекта и работы его оборудования. К примеру, для ГТС использование единой сейсмической аппаратуры позволяет объединить воедино три независимые системы мониторинга. Важным моментом является инновационность ряда подходов, что позволяет вывести Российскую гидроэнергетику в области предотвращения ЧС природного и техногенного характера в мировые лидеры.

3 Сейсмический мониторинг Западного арктического сектора РФ

3.1 Развитие сейсмических наблюдений на Европейском Севере

сейсмического мониторинга Европейского Севера как постоянных Начало сейсмологических наблюдений связано с работами князя Б.Б. Голицына, когда в 1901 г. была создана первая в стране сейсмическая станция «Пулково». Затем к мониторингу этого региона подключились: Норвегия, открыв сейсмостанцию «Bergen» (1904), Швеция - «Abisko» (1906) и Исландия - «Reykjavik» (1909). В 1911-1912 гг. инструментальная регистрация шести сильных землетрясений в районе архипелага Шпицберген была осуществлена Георгом Ремпом при проведении комплексных исследований в составе Полярной экспедиции Германии. Аналоговая сейсмическая аппаратура была низкочувствительной, поэтому вплоть до 1950-х гг. европейская сеть сейсмического мониторинга, расположенная на удалении 700-1000 км от Полярного круга, могла без пропусков регистрировать лишь наиболее сильные землетрясения с магнитудами 5 и более (Панасенко, 1957). К примеру, в российской части Европейского Севера инструментально было зарегистрировано только Беломорское землетрясение 30.06.1911 с магнитудой 3.7 (по оценке станции «Пулково») и с интенсивностью сотрясений на Терском берегу Белого моря 4–5 баллов (Горшков, 1947; Панасенко, 1957; Никонов, Пономарева, 2008).

С конца XIX в. до середины XX в. основным источником сведений для пополнения базы знаний о сейсмичности Европейского Севера были в основном макросейсмические данные в виде описательной информации от населения (Панасенко, 1969). Итоги этого полувекового периода сейсмического мониторинга были подведены в сводных региональных каталогах, вышедших в середине XX в. в Швеции и СССР (Горшков, 1947; Båth, 1956; Панасенко, 1957). В России подобный способ сбора макросейсмических данных о землетрясениях попытались ввести еще до Первой мировой войны, но из-за низкой плотности населения и почтовой сети на европейском Севере России система оказалась гораздо менее эффективной, чем в странах Скандинавии (Виноградов и др., 2012). В скандинавском каталоге за 1891–1959 гг. (Båth, 1956) представлены данные о 1073 землетрясениях, отмеченных на территории Норвегии, Швеции и Финляндии. Данный каталог был основным источником фактического материала для сейсмологов того времени.

В СССР достоверно установленными были признаны всего лишь 25 сейсмических событий, произошедших на северо-западе страны, и только 12 из них включены в первый сводный каталог землетрясений СССР 1949 г. в качестве землетрясений тектонического происхождения. В последующие годы исторические изыскания позволили добавить к

этому перечню еще два сильных землетрясения: 1542 г. – эпицентр в акватории Кандалакшского залива, сотрясения на побережье до 6 баллов; 04.05.1626 – землетрясение с M=5.1–6.5 в восточной части Белого моря, вызвавшее сотрясения на Кандалакшском и Терском берегу до 7,5 баллов по шкале МСК-64 (*Виноградов и др., 2012; Никонов, 2013*). При этом для землетрясения 1627 года, сильнейшего для ВЕП, в работе (*Tatevossian et al, 2011*) обосновываются иные параметры эпицентра: 03 июнь (±1 месяц) 1626 г.; t₀=3.00-5.00; 64.5° с.ш. ±100 км, 31.3 ° в.д. ±50 км; I₀=6-7 (EMS); M=4.7-5.7.

В 1936 г. АН СССР было принято решение об организации в Хибиногорском рудном районе сейсмостанции при Кольской базе имени С.М. Кирова АН СССР для обеспечения промышленной безопасности строящихся каскадов гидроэлектростанций, рудников и металлургических заводов. Вторая мировая война внесла коррективы, приступить к реализации данного замысла стало возможно лишь в 1950-е годы. В 1956 г. на Кольском полуострове была открыта станция «Апатиты» (1956), в 70-х годах – «Полярные Зори», «Полярный Круг», «Кемь», «Амдерма» на побережье Карского моря. С 2000-х начато тесное сотрудничество с норвежской компанией NORSAR, которое позволило установить первую в России и до сих пор единственную заполярную малоапертурную сейсмическую группу (*Виноградов и др., 2012*).

В СССР за весь период сейсмологических наблюдений на территории Северного полярного круга функционировало всего пять пунктов сейсмических наблюдений -«Апатиты», «Хейс», «Норильск», «Тикси» и «Иультин» (Панасенко, 1986; Аветисов, 1996). До 1960 г. информация о землетрясениях Европейского Севера поступала с сейсмических станций, расположенных на телесейсмических расстояниях от событий и в полушария – «Пулково», средних широтах Северного «Москва», «Обнинск», «Свердловск» (Юдахин, Французова, 2001). Созданные в период Международного геофизического года (1957-1958 гг.) сейсмические пункты расширили исследования сейсмических явлений территорий Северного полярного круга. Сложившаяся к 1960 г. сейсмических станций уверенно сеть аналоговых регистрировала арктические землетрясения с магнитудой 4.5 и более, а для отдельных частей региона и более слабые – с магнитудой 4. К концу 1980-х годов в Арктике различными странами было установлено 43 станции, магнитудный порог чувствительности сейсмических станций соответствовал значениям от 3.9 до 4. В тоже время, в Северной Канаде и Аляске магнитудный порог приближался к значениям от 3 до 3.5, а в Фенноскандии – от 2 до 2.5 (Ассиновская, 1994; Аветисов, 1996; 1999).

В высоких широтах Российской Арктики действовали следующие станции: на о. Земля Александры арх. ЗФИ работало две станции экспедиции НИИГА: в период с 1962

по 1963 гг. и станция «Арктическая» в 1968–1970 гг. Отметим, что впервые слабые землетрясения в районе желоба Франц-Виктория были зафиксированы станцией «Арктическая» (Аветисов, 1971; Аветисов, Голубков, 1971). Станция «Хейс» на о. Хейса этого же архипелага в составе комплексной метеорологической и геофизической обсерватории РАН и Гидромета СССР проработала с 1957 по 1992 гг. С 1982 г. непрерывно функционируют российские сейсмологические станции на арх. Шпицберген. В результате, практически весь шельф Баренцева моря и прилегающая к нему с юга северо-восточная часть Балтийского щита была охвачена сейсмическими станциями (рисунок 3.1), образовывая основу Баренцевоморской региональной сети сейсмического мониторинга (Виноградов и др., 2012).



Рисунок 3.1 – Схема размещения станций Баренцевоморской региональной сети сейсмомониторинга, созданной КФ АН СССР в 1956–1983 гг. (Виноградов и др., 2012)

По внешнему северному контуру сети в зоне досягаемости оказалась западная часть континентального склона Евразии и срединно-океанические хребты Северной Атлантики. Магнитудный порог чувствительности сети для этого региона был понижен до 3.9-4.2, точность локации эпицентров поднялась с ± 100 км на уровне 1956 г. до ± 25 км по широте и ± 50 км по долготе; количество ежегодно регистрируемых событий возросло до 310-350, тогда как общегосударственная сеть ЕССН регистрировала здесь не более 10 событий в год, а мировая система ISC – от 4 до 15. Накопленный сетью в течение 1980-х годов материал позволил детализировать и уточнить региональные схемы сейсмотектонического районирования и дать более реалистичную оценку степени сейсмического риска при ведении хозяйственной деятельности в Евро-Арктическом регионе (Панасенко, 1987; Ассиновская, 1994; Маловичко и др., 2014).

В 1993 г. сотрудниками КНЦ РАН была установлена микросейсмическая группа в сейсмическом пункте «Амдерма». В итоге Баренцевоморская сеть обеспечила представительность регистрации сейсмических событий по береговой зоне Баренц-региона на уровне М=3.0-3.5 (Виноградов и др., 2012). Но восточная часть этого региона (территория Архангельской обл.) по-прежнему оставалась практически не охваченной сейсмологическими наблюдениями из-за отсутствия сейсмических станций (Юдахин, Французова, 2001).

В период распада СССР большинство арктических сейсмических пунктов было закрыто. К вопросу о недостаточной сейсмологической изученности Севера Русской плиты вернулись в 2002 г., благодаря инициативе член-корр. РАН Феликса Николаевича Юдахина и при поддержке академика РАН Николая Павловича Лаверова, что, в конечном итоге, привело к созданию Архангельской сейсмической сети (Сейсмологические исследования..., 2011).

По сравнению с таким сейсмоактивным районом как Киргизия, где ранее жил и работал Феликс Николаевич, север России (территория Архангельской области и НАО) – асейсмичный район с магнитудой не более 4 (Ассиновская, 1994; Маловичко и др., 2014). Сильные землетрясения, согласно архивным данным, случались, но крайне редко (рисунок 3.2) (Ананьин, 1977; Панасенко, 1986; Mäntyniemi et al., 2011; Никонов, 2004; 2013; Конечная, 2015; Морозов и др., 2016; 2018). Тем не менее, Ф.Н. Юдахин жил идеей покрытия планеты сейсмологическими наблюдениями и приложил немало усилий для обоснования необходимости создания сейсмической сети на платформенной территории (Юдахин, Франиузова, 2001; 2006). Этому способствовало и сформировавшееся на рубеже веков новое направление исследований в науках о Земле – геодинамика платформенных территорий, отдельных блоков земной коры и зон их сочленения (Макаров и др., 1982; Макаров, 1996; Проблемы геофизики XXI века, 2003), а также создание в 1994 г., согласно постановления Президиума РАН, Геофизической службы РАН (ГС РАН) (Мишаткин, 2007). При активном содействии ГС РАН стали развиваться региональные сейсмические сети не только в сейсмоактивных регионах, но и на платформенных территориях. Начался этап возрождения и развития сейсмических сетей на территории РФ.

Первые исследования сейсмической активности платформенных территорий, проводимые под руководством чл.-корр. РАН, профессора Ф.Н. Юдахина и активном участии к.ф.-м.н., доцента В.И. Французовой, выявили недостаточное на 2003 г. количество пунктов сейсмических наблюдений для решения региональных задач (Юдахин, Французова, 2006; 2011; Антоновская и др., 2013). На территории Архангельской области и НАО сосредоточено большое количество крупных промышленных объектов:

судоремонтные заводы, целлюлозно-бумажные и лесоперерабатывающие комбинаты, карьеры; нефте- и газопроводы, а также космодром «Плесецк», что предполагало проведение наблюдений на территориях их размещения.



а – на территории Архангельской области и в сопредельных регионах за период 1542–2005; б – на территории Архангельской области за период 1627–2002 (линией указан район выборки)
Рисунок 3.2 – Карта эпицентров тектонических землетрясений

С 2005 по 2007 гг. на базе Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (с 2016 г. Институт вошел в состав Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики (ФГБУН ФИЦКИА РАН)) было открыто еще три пункта сейсмических наблюдений на территории Архангельской области, аппаратура для была получена от Уральского отделения РАН. Дальнейшее развитие которых Архангельской сети происходило по инициативе сотрудников лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН под руководством заведующей лабораторией Г.Н. Антоновской и большей частью за счет средств научных проектов, выполняемых самой лабораторией. В итоге, на создание и развитие сети, подготовку квалифицированных специалистов ушло 10 лет. На рисунке 2.8 главы 2 представлена современная конфигурация Архангельской сейсмической сети, в таблице 3.1 приведены основные сведения о сейсмологических пунктах, входящих в ее состав за весь период функционирования сети. Существенно, что при оборудовании пунктов сейсмических наблюдений, особое внимание обращалось на использование цифровой аппаратуры современного уровня, преимущественно чувствительной и широкополосной. Часть станций было закрыто в силу развития хозяйственной и транспортной деятельности в районе установки станции.

Наименова- ние	Код станции	Междуна родный код	Широта	Долгота	Высота, м	Период работы, mm/уууу	Аппара- тура	Тип каналов/частота отсч./с	Принадлеж- ность	Статус
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Андозеро	ADZ	ADZR	63.929	38.285	51.00	06/2015- по н.в.	СМ3-КВ	SHZ, SHN, SHE/40	ФИЦ ЕГС РАН, ФИЦКИА РАН	Открыта
Амлерма	AMDE	AMDE	69 761	61 678	48.00	11/2010-08/2012	CMG- 3ESP	BHZ, BHN, BHE/50	ФИПКИА РАН	
Амдерма	AMDL	ANDL	07.701	01.078	40.00	09/2012 – по н.в.	CMG-40T	SHZ, SHN, SHE/50	ΨΗΠΚΗΥΙΑΠ	Открыта
Архангельск	ARH	ARHR	64.551	40.515	23.00	11/2002-11/2014	СМ3-КВ	SHZ, SHN, SHE/20	ФИЦКИА РАН	Закрыта
Климовская	KLM	KLMR	60.854	39.519	157.00	11/2003- по н.в.	СМ3-КВ, СМ3_ОС	BHZ, BHN, BHE/50, SHZ, SHN, SHE/50	ФИЦ ЕГС РАН, ФИЦКИА РАН	Открыта
Ломоносово	LMV	_	64.230	41.730	20.00	06/2011-05/2012	CMG-6TD	BHZ, BHN, BHE/50	ФИЦКИА РАН	Закрыта
Политоного	I CII	I CII	64 870	15 721	60.00	10/2006-07/2007	CMG-40T	SHZ, SHN, SHE/50		
лешуконское	LSH	LSU	04.879	43.734	60.00	12/2007-по н.в.	CMG- 3ESP	BHZ, BHN, BHE/50	ФИЦКИА ГАП	Открыта
Нарьян-Мар	NRM	_	67.652	53.037	10.00	08/2011-12/2013	CMG-6TD	BHZ, BHN, BHE/50	ФИЦКИА РАН	Закрыта
Омега	OMEGA	_	80.784	47.732	24.00	08/2015 – по н.в.	CMG-3T	BHZ, BHN, BHE/50	ФИЦКИА РАН	Открыта
Поморье	PMR	-	65.331	41.121	12.00	07/2014-05/2015	CMG-6TD	BHZ, BHN, BHE/50	ФИЦКИА РАН	Закрыта
Пермогорье	PRG	PRGR	61.638	45.627	84.00	11/2003 – по н.в.	СМ3-КВ	SHZ, SHN, SHE/40	ФИЦ ЕГС РАН, ФИЦКИА РАН	Открыта
Пермилово	PRM	_	63.617	40.509	52.00	11/2005 – по н.в.	CMG-40T	S Z, S N, S E/50	ФИЦКИА РАН	Открыта

Таблица 3.1 – Информация о пунктах сейсмических наблюдений Архангельской сети

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Содориц		SI VD	65 028	25 702	15.00	10/2007-08/2012	CMG-40T	SHZ, SHN, SHE/50	ФИПКИХ РАП	Закрыта
Соловки	SLV	SLVK	03.028	55.702		10/2012-06/2016	CMG-6TD	BHZ, BHN, BHE/50	ФИЦКИА ГАП	
Северная Земля	SVZ	_	79.276	101.657	22.00	12/2016 – по н.в.	CMG-6TD	BHZ, BHN, BHE/50	ФИЦКИА РАН	Открыта
Тамица	ТМС	TMCR	64.164	38.035	22.69	11/2003-03/2015	CM3-KB (CM-3)	SHZ, SHN, SHE/40	ФИЦ ЕГС РАН, ФИЦКИА РАН	Закрыта
	ZFI	ZFI	80.807	47.659	17.00	09/2011 – по н.в.	CMG-6TD	BHZ, BHN, BHE/50	ФИЦКИА РАН	Открыта
Земля Франца- Иосифа	ZFI2	ZFI2	80.809	47.655	18.00	09/2011 - 07/2015 08/2015 - 09/2016 10/2016-9/2017 9/2017- по н.в.	CMG-40T CMG-6TD CMG-40T TC-120s	SHZ, SHN, SHE/50 BHZ,BHN, BHE/50 SHZ, SHN, SHE/50 BHZ,BHN, BHE/50	ФИЦКИА РАН	Открыта
	ZFI3	_	80.809	47.613	18.00	08/2012-04/2015	CMG-6TD	BHZ, BHN, BHE/50	ФИЦКИА РАН	Закрыта

Сейчас, когда наличие в Европейской Арктике огромных минерально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов не вызывает сомнений, когда эксплуатация их представляется технически осуществимой и экономически выгодной и появляется угроза возникновения чрезвычайных ситуаций, причина которых может быть как техногенная, так и природная, в том числе вследствие потепления климата. В связи с этим, необходимость проведения сейсмологического мониторинга и развитие сетей сейсмических наблюдений не вызывает сомнений.

3.2 Архангельская сейсмическая сеть

Факт принадлежности Архангельской сети к лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН позволяет рассматривать ее как научную установку³, на базе которой реализуются следующие задачи:

- телесейсмический мониторинг в структуре ФИЦ ЕГС РАН;

 – региональный сейсмический мониторинг Европейского сектора Арктики с выделением сейсмогенерирующих структур и увязкой их с геодинамикой;

- уточнение строения земной коры и верхней мантии;

 проработка методических вопросов локации сейсмических событий природного и техногенного характера.

Существенно, что последние три выполняются силами лаборатории сейсмологии.

3.2.1 Телесейсмический мониторинг в структуре ФИЦ ЕГС РАН

Эта задача стояла перед лабораторией сейсмологии с первого дня основания сети. Результатам телесейсмического мониторинга посвящен ряд исследовательских работ (Юдахин и др., 2004; Французова, Ваганова, 2007; Французова и др., 2009; Французова и др. 2011; Юдахин и др., 2011). Ежедекадный станционный бюллетень, содержащий информацию о зарегистрированных телесейсмических событиях, отправляется в обрабатывающий центр ФИЦ ЕГС РАН. Ежегодно станциями Архангельской сети регистрируется более 2000 мировых землетрясений (Сейсмологические исследования..., 2011). На рисунке 3.3 приведен пример карты зарегистрированных телесейсмических землетрясений за 2016 г. Согласно (Французова и др., 2009; Французова и др., 2012;

³ В 2014 г. Архангельской сейсмической сети был предоставлен статус Уникальной научной установки (УНУ «АСС»)

Конечная, 2015) представительный уровень магнитуды АСС для телесейсмических событий mb = 5.3-5.5.

3.2.2 Региональный мониторинг

3.2.2.1 Особенности сейсмических наблюдений

Европейский сектор Арктики в целом считается асейсмичным регионом, но количество сейсмических событий, зарегистрированных в период с 1995 по 2015 гг. в связи с совершенствованием наблюдений арктических сетей, указывает на необходимость ревизии данных представлений, к тому же, сейсмическая активность является индикатором геодинамических процессов.



Система координат – World Mercator, проекция – Mercator, система координат – WGS 1984 Рисунок 3.3 – Карта телесейсмических землетрясений, зарегистрированных Архангельской сейсмической сетью за 2016 г.

В настоящее время инструментальные наблюдения сейсмичности Европейского сектора Арктики осуществляются рядом отечественных и зарубежных сейсмических служб и сетей, среди которых выделим норвежский сейсмологический центр NORSAR (<u>www.norsardata.no</u>), занимающийся фундаментальными исследованиями в области сейсмологии. В России сейсмический мониторинг Европейского сектора Арктики осуществляют Кольский филиал Единой Геофизической Службы РАН (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) (<u>http://www.krsc.ru</u>) и Архангельская сейсмическая сеть ФГБУН ФИЦКИА РАН (<u>http://fciarctic.ru/index.php?page=geoss</u>).

Каждая сейсмологическая служба имеет свои приоритетные зоны регистрации землетрясений, объединение усилий позволяет повысить точность локации эпицентров землетрясений и понизить регистрируемый энергетический уровень. По базам данных NORSAR, ФГБУН ФИЦКИА РАН и КоФ ФИЦ ЕГС РАН был создан Обобщенный сейсмический каталог за 1995-2015 гг. Для каждой сети были определены приоритетные зоны, позволяющие вычислять параметры эпицентров с минимальными ошибками. Например, для сети NORSAR зонами ответственности являются территории хребтов Мона и Книповича, архипелаг Шпицберген; для Архангельской сети – это район хр. Гаккеля и арх. ЗФИ и арх. Новая Земля (рисунок 3.4). На континентальной части приарктических территорий Архангельской сетью проводится мониторинг территории севера Русской плиты и наиболее сильных событий Скандинавского и Кольского полуострова, Полярного и Северного Урала (*Хуторской и др., 2015; Антоновская и др., 2018*).



1 – землетрясения, 2 – одиночные трехкомпонентные сейсмические станции, 3 – сейсмические группы, 4 – землетрясения с магнитудой >5.0

Рисунок 3.4 – Сейсмические события 2012-15 гг. по данным NORSAR (а) и как результат кооперации NORSAR, КоФ ФИЦ ЕГС РАН и ФГБУН ФИЦКИА РАН (б)

Оценку сейсмической обстановки исследуемого региона осложняет и тот факт, что каталоги, принадлежащие различным сейсмическим сетям и службам, не унифицированы по форме представления материалов, базируются на разном количестве и качестве исходных данных и разных способах обработки. Параметры одних и тех же землетрясений в разных источниках довольно часто отличаются. В связи с этим, актуальным является обобщение сейсмической информации и повышение качества локации сейсмических событий Европейского сектора Арктики.

По базам данных норвежской сейсмической сети NORSAR, Архангельской сейсмической сети ФГУБН ФИЦКИА РАН и сети Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН был создан Обобщенный сейсмический каталог за 1995-2015 гг. (таблица 3.2).

Обобщенный каталог содержит информацию о землетрясениях Европейского сектора Арктики выше 70° с.ш., зарегистрированных минимум тремя сейсмическими станциями. Он состоит из двух частей: основное решение по землетрясениям согласно приоритетным районам размещения сети и альтернативный вариант расчета параметров землетрясений – решение из неприоритетного района. В большинстве случаев параметры землетрясений рассчитаны только по данным одной из сетей. Для повышения эффективности мониторинга мы предложили следующий подход. Учитывая факт наблюдения событий одной из сетей, создается основа для поиска его на соответствующих временах в волновых формах других сетей, что эффективно, т.к. часто слабые события пропускаются оператором. Магнитудный диапазон землетрясений для Европейского сектора Арктики, согласно полученному каталогу, от 0.9 до 6.2, представительная магнитуда за 1995-2015 гг. ML_{пред}=2.7 (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Кумулятивный график повторяемости за 1995-2015 гг., ML_{пред}=2.7

Для исследуемого района (рисунок 3.6) составлена сводная карта сейсмичности, в которую вошли данные: из Обобщенного сейсмического каталога с дополнением данных УНУ «АСС» за 2005-2017 гг., для района арх. Новая Земля – сведения о землетрясениях с 1974 г. по 2017 гг., для севера ВЕП – с 1991 г. (Morozov et al., 2017), которые подразделяются на типы: землетрясения и техногенные события (взрывы; запуски и падения ступеней ракет). На континентальной части района сейсмические события преимущественно техногенные, исключением является Кандалакшский грабен, где фактором отмечается природная сейсмическая активность. Новым являются землетрясения, зафиксированные в районе прохождения Северного морского пути, что наглядно показывает актуальность развития сейсмических сетей в Арктике.

Основное решение					Альтернативный вариант								
Дата	Время	Шир.	Дол.	М	Регион	Источник	Дата	Время	Шир.	Дол.	Μ	Регион	Источник
08.10.2013	01.39.58.98	74.29	15.23	4.3	Хребет Мона	NORSAR	08.10.2013	01:40:00.00	74.44	15.30	_	Хребет Мона	ACC
08.10.2013	09:10:26.00	84.06	4.51	3.3	Хребет Гаккеля	ACC	_	_	_	-	_	_	_
09.10.2013	03.32.57.01	73.17	7.31	3.0	Хребет Мона	NORSAR	_	_	_	-	_	_	_
09.10.2013	17.47.09.22	76.96	18.28	3.1	Шпицберген	NORSAR	09.10.2013	17:47:10.00	76.93	18.28	3.5	Шпицберген	ACC
09.10.2013	06:13:55.00	81.42	-1.63	3.6	Хребет Книповича	ACC	_	_	_	-	_	_	_
16.10.2013	16:33:09.00	79.14	4.19	3.5	Хребет Книповича	ACC	_	_	_	-	_	_	_
18.10.2013	02:05:18.45	84.56	12.47	-	Хребет Гаккеля	ACC	_	_	_	-	_	_	-
20.10.2013	16.49.53.84	72.33	2.73	3.4	Хребет Мона	NORSAR	_	_	_	-	_	_	_
21.10.2013	19:04:49.84	86.28	49.91	3.3	Хребет Гаккеля	ACC	_	_	_	-	_	_	_
22.10.2013	22.45.10.94	73.53	8.47	3.4	Хребет Мона	NORSAR	_	_	_	-	_	_	-
23.10.2013	10.31.04.81	77.76	8.56	3.7	Хребет Книповича	NORSAR	23.10.2013	10:31:08.96	77.78	8.99	3.9	Хребет Книповича	ACC
23.10.2013	14:17:00.00	85.25	26.91	3.0	Хребет Гаккеля	ACC	-	-	-	-	_	_	-
24.10.2013	09.51.00.83	77.92	8.50	2.2	Хребет Книповича	NORSAR	24.10.2013	09:51:01.00	77.88	8.58	3.2	Хребет Книповича	ACC
24.10.2013	21:56:44.00	77.87	8.75	3.6	Хребет Книповича	ACC	-	_	—	-	-	—	-
24.10.2013	12:17:25.00	81.31	-4.25	3.4	Хребет Книповича	ACC	_	—	_	-	_	—	_
24.10.2013	23:46:07.00	85.01	12.02	3.4	Хребет Гаккеля	ACC	_	—	_	-	_	—	_
25.10.2013	22.48.21.73	76.60	9.08	2.6	Хребет Книповича	NORSAR	25.10.2013	22:48:21.00	76.77	7.79	-	Хребет Книповича	ACC
25.10.2013	01:25:56.00	80.33	40.06	1.9	Грабен Франц- Виктория	ACC	_	_	_	_	_	_	_
25.10.2013	09:50:35.00	85.45	27.58	3.0	Хребет Гаккеля	ACC	-	_	_	-	_	_	

Таблица 3.2 – Вид «Обобщенного сейсмического каталога»

Примечание: М – магнитуда, АСС – Архангельская сейсмическая сеть.



1 – карьерные взрывы; 2 – карьеры; 3 – линия Северного морского пути; 4 – запуски ракет; 5 – взрывы газа; 6 – падение ступени ракеты

Рисунок 3.6 – Сводная карта распределения сейсмических событий, включающая данные: из Обобщенного сейсмического каталога с дополнением данных Архангельской сейсмической сети за 2005-2017 гг., для района арх. Новая Земля – сведения о землетрясениях с 1974 г. по 2017 гг., для севера ВЕП – с 1991 г.

Анализ выделения сейсмической энергии по 5-летним интервалам (таблица 3.3) за 2000-2015 гг. показывает, что количество относительно сильных событий ($M \ge 5.0$) в рассматриваемом регионе примерно постоянно во времени. Увеличение количества слабых толчков (M < 5.0) связано с расширением сети инструментальных наблюдений, в том числе в Российском секторе Арктики, более подробно см. в работах (*Конечная, 2015; Рогожин и др., 2016*).

Пориод вр	Количе	Daara		
период, п.	M<3.5	3.5≤M<5	M≥5	Bcero
2000-05	778	125	24	927
2005-10	1274	129	36	1439
2010-15	2818	237	28	3083
Всего	4870	491	88	5449

Таблица 3.3 – Параметры сейсмичности арктического региона за 2000-15 гг.
Все это демонстрирует недостаточность информации о сейсмичности арктических территорий и эффективность подхода подключения к обработке не только каталогов, но и волновых форм всех доступных сетей (Конечная, 2015). Кроме того, полученная нами новая карта сейсмичности (рисунок 3.6) является основой для составления сейсмотектонического структурирования Западного арктического сектора РФ и уточнения геодинамических представлений об этом регионе.

Техногенная сейсмичность. В большинстве случаев обработка событий техногенной природы севера Русской плиты проводится по данным одной станции из-за недостаточной плотности сети. Как правило, для анализа привлекается информация о местоположении карьера и накопленная нами база характерных волновых форм техногенных событий в его районе.

Таким образом, Архангельскую сейсмическую сеть можно рассматривать как инструмент, пригодный для сейсмического мониторинга и уточнения природы геодинамических процессов Западного арктического сектора РФ. Ее особенностью по сравнению с региональными сетями, является то, что охватываемая территория включает как континентальную, так и океаническую кору: северные окраины ВЕП, Баренцево-Карский регион и хребет Гаккеля. Существует отличие и в методике локации сейсмических событий. Необходимой процедурой является привлечение волновых форм со станций других сетей, расположенных в рассматриваемом регионе, создавая так называемую «виртуальную» сейсмическую сеть (*Havskov, Alguacil, 2004; Конечная, 2015*). Обычно сейсмологические службы производят локацию событий по собственным станциям, лишь при необходимости привлекая времена вступлений, указанные в каталогах других сетей.

По данным УНУ «Архангельская сейсмическая сеть» (УНУ «АСС») ежемесячно составляются каталоги и карты сейсмичности Европейского сектора Арктики (<u>http://fciarctic.ru/index.php?page=geoss</u>), которые отражают природную и техногенную сейсмичность изучаемого региона. Для этого были построены региональный и локальный годографы (*Barahoba, 2012; Конечная, 2015; Morozov et al., 2015*).

3.2.2.2 Чувствительность Архангельской сейсмической сети

Открытие островных станций в Российской Арктике (см. таблицу 3.1) позволило повысить магнитудную чувствительность регистрируемых событий для Западного арктического сектора РФ в целом и охватить восточную и северо-восточную части этого региона, мониторинг которых выполнялся ранее весьма фрагментарно. За 2011-2017 гг.

представительная магнитуда землетрясений ($ML_{пред}$), входящих в каталог, для рассматриваемого региона по данным станций Архангельской сети (рисунок 3.6) находится в диапазоне от 2.7 до 3.5 (таблица 3.4), магнитудный диапазон зарегистрированных региональных событий от 0.6 да 6.0. Для определения значений локальной магнитуды ML (MWA) используется реализованный в программе WSG способ расчета, основанный на осредненной по Северной Евразии калибровочной функции (*Габсатарова, 2006*).

Таблица 3.4 – Зависимость ML_{пред} от количества пунктов сейсмических наблюдений в Арктике (по данным Архангельской сейсмической сети)

	Количество пунктов сейсмических наблюдений									
				на остро	овах					
Год	на материке,	всего,	Рабо	чий период	ц работы остро	овных	MLпред			
	всего, шт.	IIIT.		СТ	анции					
			ZFI, %	ZFI2, %	OMEGA, %	SVZ, %				
2003-	7						25			
2011	1	_	_	_	—		5.5			
2012	8	1	47	93	—	-	2.9			
2013	8	1	3	100	100 –		2.7			
2014	8	1	30	100	—		2.9			
2015	7	2	72	69	26		3.0			
2016	7	2	100	87	28	11	3.5			
2017 (I- IV)	6	3	33	27	22	34	3.8*			

* Величина обусловлена малой выборкой – 4 месяца

Примечание: 100% берется из расчета бесперебойной работы станции в течение 12 месяцев.

Анализируя данные таблиц 3.3 и 3.4 видно, что со временем количество событий, в том числе слабых, увеличивается, станции работают хорошо, а величина представительной магнитуды – увеличивается, хотя, казалось бы, она должна снижаться. Учитывая, что это один из главных параметров, характеризующих мониторинг, остановимся на этом вопросе подробнее. Как известно, значение представительной магнитуды (ML_{пред}) зависит не только от количества функционирующих пунктов сейсмических наблюдений, но от типа регистрируемой аппаратуры, ее технических характеристик, зашумленности места установки, временного периода, используемого для оценки магнитуды, экзогенных сезонных вариаций (особенности ледовой обстановки на акватории), близости расположения эпицентров землетрясений к пункту сейсмических наблюдений. Приведем ряд характерных примеров функционирования стационарных сейсмических пунктов, влияющих на значение представительной магнитуды.

Пример 1 – Влияние уровня шума и длительности временного интервала. В таблице 3.5 приведено распределение количества регистрируемых землетрясений, включенных в каталог, за период 2012-2016 гг. в двух интервалах: с магнитудой до 2.9 включительно и более 3.0. Анализ таблицы показывает, что с 2014 г. количество регистрируемых низкомагнитудных землетрясений (ML<2.9) резко уменьшается, что в итоге сказывается на значении представительной магнитуды (таблица 3.4).

Таблица 3.5 – Распределение количества землетрясений, регистрируемых ACC по годам

Годы	ML<2.9	ML>3.0	Всего
2012	192	79	271
2013	362	138	500
2014	268	221	489
2015	56	142	198
2016	19	319	338

Почему это происходит? Отметим, что регистрацию основной массы слабых событий обеспечивает функционирование станций на Земле Франца-Иосифа, что видно из таблицы 3.4, где минимальные значение ML_{nped} получены при 93-100% работе станции ZFI2. С 2014 значение ML_{nped} начало увеличиваться (таблица 3.4). Возможной причиной является начало строительства базы ПВО РФ (работы продолжаются по настоящее время), что проявилось в зашумленности волновых форм на сейсмических станциях и сложности выделения слабых землетрясений из общего фона (рисунок 2.7).

Конечно, не стоит исключать и возможный факт общей тенденции изменения сейсмической ситуации региона, особенно в ее низкомагнитудной части (для выявления этой особенности нужен длительный период наблюдений), но технические характеристики регистрирующей аппаратуры имеют первостепенное значение на качество регистрируемого материала.

Пример 2 – Влияние расположения сейсмоактивных зон. Для пункта сейсмических наблюдений SVZ («Северная Земля») большинство сейсмических событий происходит на эпицентральных расстояниях 3.5° —4°, ML_{пред}=2.5. Достаточно малые значения ML_{пред} связаны с низким уровнем техногенных помех и более близкими расстояниями от станции SVZ до эпицентров землетрясений, происходящих, к примеру, на хребте Гаккеля. Для сравнения пункт сейсмических наблюдений «Земля Франца-Иосифа» регистрирует события с расстояний 6.5°—7° (до хребта Гаккеля) и имеет в среднем ML_{пред}=2.8.

Остановимся на точности локации сейсмических событий, регистрируемых в Западном арктическом секторе РФ. Нами принята схема обработки, при которой первоначальным является выделение сигнала на станциях АСС и затем поиск соответствующих волновых форм на записях станций других сетей. Подробно методика описана в работе (Конечная, 2015). В таблице 3.6 приведена точность определения эпицентров землетрясений для приоритетных зон мониторинга АСС. Определение параметров события и оценка их точности производиться методом «Generalized beamforming» (Kvaerna, Ringdal, 1996) в усовершенствованном варианте, реализованном в программе NAS (Asming, Prokudina, 2016), в которой имеется возможность выбора разных годографов. В частности для Баренц-региона используется годограф BARENTS Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН, для района хребта Гаккеля – NOES (Konevnaя, 2015; Morozov et al., 2016).

	Эллипс ошибок							
Наименование региона	Rmin, км	Rmin _{cp.знач.} , км	Rmax, км	Rmax _{ср.знач.} , км				
Северные окраины ВЕП	от 7 до 11	9	от 8 до 19	14				
Беломорский регион	от 2 до 10	5	от 3 до 16	8				
Новоземельский регион	от 11 до 43	20	от 17 до 94	37				
Континентальный шельф	(данные требуют уточнения)	5	(данные требуют уточнения)	8				
Хребет Гаккеля: Западная вулканическая зона	от 24 до 31	27	от 44 до 57	53				
Центральная амагматическая зона	от 23 до 32	27	от 36 до 66	48				
Восточная вулканическая зона	от 24 до 62	41	от 34 до 71	53				

Таблица 3.6 – Эллипсы ошибок эпицентров землетрясений

В программе NAS задается исходная точка пространства-времени – приблизительная локация сейсмического события и его примерное время. Далее программа NAS производит уточнение координат и времени в окрестности этой исходной точки, выбирает круг большого радиуса (например, радиус 250 км) вокруг исходной точки, где ищется более точная локация. В этом круге формируется сетка из перекрывающихся кругов меньшего радиуса. Для каждого меньшего круга вычисляется рейтинговая функция R(c,t) с доверительным интервалом, оценивающая гипотезу о том, что событие произошло в ячейке с в момент времени t.

Большой разброс в значениях осей эллипсов ошибок связан с преобладающим количеством низкомагнитудных землетрясений, которые регистрируются малым числом

сейсмических станций (в основном не более трех), их односторонним расположением относительно эпицентра, а также с удаленностью эпицентров землетрясений от регистрируемой станции. Например, для севера ВЕП, Беломорского и Новоземельского регионов эллипсы ошибок вычислялись для землетрясений за весь период инструментальных наблюдений, для хребта Гаккеля – только для низкомагнитудных землетрясений, как преобладающих, и по данным всего трех станций.

Оценка точности регистрируемых событий необходима для понимания возможностей созданного инструмента, эффективности используемого методического подхода по обработке данных, а главное – проработки шагов по дальнейшему усовершенствованию инструмента, в том числе оценке эффективности выбора места каждой новой сейсмической станции.

Тем не менее, несмотря на ряд технических особенностей конфигурации АСС, арктические пункты сейсмических наблюдений позволяют получать дополнительную информацию о сейсмической активности континентального шельфа (рисунок 3.9) и срединно-арктических хребтов. К примеру, за период с октября 2011 по декабрь 2013 гг. в районе зоны перехода «континент-океан» Баренцево-Карского региона было зарегистрировано 66 землетрясений. Значения магнитуд землетрясений (ML) варьируются от 0.7 до 3.6. Для каждого землетрясения были рассчитаны основные параметры (Конечная, 2015; Morozov e al., 2015). Однако из-за небольших значений магнитуд и удаленности сейсмических станций как АСС, так и зарубежных, вычислить значения глубин не удалось.

Проиллюстрируем возможности регионального сейсмического мониторинга для структурных исследований. На рисунке 3.9 прослеживается четкая приуроченность эпицентров землетрясений к отрицательным морфоструктурам континентального склона (грабенам). В районе грабенов эпицентры землетрясений расположены также неравномерно и тяготеют к их устьевым частям. Значительная часть эпицентров приурочена к поднятию Белый и Виктория между грабенами Орли и Франц-Виктория. В частности, можно отметить зону повышенной сейсмичности около о. Белый. За период наблюдений 2011-2013 гг. здесь было зарегистрировано восемь землетрясений, среди них три землетрясения с магнитудами 2.8, 2.9 и 3.6. Остальные эпицентры сосредоточены в северо-восточной и юго-восточной частях поднятия. Эти материалы дополняют исследования, приведенные в работе (*Верба, 2007*), где детально рассмотрена морфология, генезис и возраст краешельфовых желобов, обоснована их регмагенная природа, связываемая с процессами рифтогенеза при зарождении Евразийского суббассейна на стадии «break-up».



^{1 –} край континентального шельфа, перегиб флексурно-разрывной зоны; 2 – главные неотектонические разломы; 3 – границы разрывных нарушений

Рисунок 3.9 – Сопоставление эпицентров землетрясений в районе желобов Франц-Виктория и Орла (октябрь 2011 г. – декабрь 2013 г.), неотектонических структур и активных разломов (*Атлас, 2004*) в совмещении с батиметрическими данными (NOAA National Geophysical Data Center)

Еще одно соображение, показывающее возможности использования получаемого сейсмического материала. Сотрудниками Геологического Института РАН совместно с Норвежским Нефтяным Директоратом в 2006-09 гг. были проведены три экспедиции по уточнению строения отдельных участков зоны перехода «континент-океан» северозападного обрамления Баренцево моря (Зайончек и др., 2010). В ходе экспедиций на континентальном склоне Северного Ледовитого океана была выявлена система крупных оползневых тел. Ранее оползневые тела были обнаружены на континентальном склоне Норвегии, в грабене Литке и на продолжении пролива Хинлопен (Hjelstuen et al., 2007; Vanneste et al, 2006; Winkelmann et al., 2007). В толще грабена Орли были выявлены признаки интенсивного выноса крупнообломочного материала и формирование конусов выноса. На западном борту наблюдались нарушения, возникающие, скорее всего, из-за изостатической компенсации лавинного осадконакопления. Поэтому можно предположить, что восточные грабены, начиная с грабена Франц-Виктория, являются своего рода каналами для транспортировки осадочного материала, сопровождаемого повышенной сейсмичностью.

Характер проявления сейсмичности в западной части шельфа Баренцева моря в районе континентального склона изучался в Кольском филиале ГС РАН (Виноградов, Баранов, 2013). Для слабой сейсмичности (М≤2.2) в районе от пролива Стур-фьорд до

о. Медвежий была выявлена сезонность в количестве зарегистрированных землетрясений. Была выдвинута гипотеза, согласно которой большая часть слабых землетрясений является следствием оползневых процессов на крутых участках шельфа, а их сезонность – результат резкого изменения массопотока аллювиального материала в теплый сезон года. В частности, авторы, анализируя записи норвежской сейсмической группы SPITS, выявили волновые формы от оползневых явлений на севере Шпицбергена.

Таким образом, обобщая имеющиеся геофизические, геотектонические и полученные нами сейсмические данные можно предположить, что превалирующим геодинамическим фактором, отвечающим возникновение слабых землетрясений за на окраине континентального является изостатическая шельфа. компенсация лавинного осадконакопления в зоне перехода «континент-океан».

Другой пример относится к ультрамедленному спредингу хребта Гаккеля. Несмотря на длительный период сейсмических наблюдений стационарными и временными сейсмическими станциями и проведенные экспедиционные работы (Edwards et al., 2001; Schlindwein et al., 2007; Кулаков и др., 2013 и др.), слабая сейсмичность хребта Гаккеля всё еще недостаточно изучена. Исследование слабой сейсмичности расширяет представления об активных процессах в пределах хребта Гаккеля, их магматической и тектонической природе. Например, с момента открытия пункта сейсмических наблюдений «Земля Франца-Иосифа» (с 2011 по 2017 гг.) было зарегистрировано 4 роя землетрясений (рисунок 3.10):

- 29-30 апреля 2012 г. (84° с.ш., 1° в.д.), ML=2.8-3.3;

- 20-21 апреля 2012 г. (86° с.ш., 45° в.д.), ML=2.0-2.9;

- 31 декабря 2013 г. (86° с.ш., 75° в.д.), ML=2.0-3.1;

- 28-29 октября 2017 г. (87° с.ш., 54° в.д.), ML=3.0-4.7.

Существенна интерпретация не только кинематических, но и динамических характеристик волновых полей, в нашем случае – спектрально-временного анализа (СВАН), хорошее качество сейсмического материала позволило провести данную работу (Рогожин, Антоновская и др., 2016; Рогожин, Капустян и др., 2016). Анализ СВАНдиаграмм землетрясений хребта Гаккеля, сравнение с данными по подобным роям на хребте Книповича и привлечение литературных данных (Schlindwein, 2012) позволяет, предположительно, связать выделенные рои с вулканической активностью.



Рисунок 3.10 – Сейсмичность ультрамедленного хребта Гаккеля за 2011-2017 гг.

Отметим, что информация о первых трех роях отсутствует в мировых каталогах, они были выявлены, прежде всего, на записях сейсмического пункта «Земля Франца-Иосифа» и затем предпринят поиск волновых форм на других станциях. Как правило, привлекаются данные сейсмических станций, размещенных на архипелаге Шпицберген. Был оценен вклад сейсмического пункта «Земля Франца-Иосифа» в регистрацию событий хребта Гаккеля. В таблице 3.7 приведено сравнение со сведениями из международного каталога ISC (International Seismological Centre) за 2012 г., рассчитан процент событий, лоцированных лишь по трем станциям, включая ZFI2. Проведено сопоставление ML_{пред} по данным ISC и по единичной станции ZFI2 пункта сейсмических наблюдений «Земля Франца-Иосифа», на рисунке 3.11 показаны соответствующие графики повторяемости.

Отметим, что различие в значениях представительных магнитуд с таблицей 3.4 обусловлено разным временным интервалом и количеством анализируемых событий, зарегистрированных только одной станцией.

Различие в сравниваемых периодах времени связано с отсутствием необходимого количества землетрясений для расчета ML_{пред} в базе данных ISC за 2011-2015 гг. при выделении отдельно данных по станции ZFI2.

Таблица 3.7 – Вклад станции ZFI2 в регистрацию землетрясений хребта Гаккеля за 2012 г.

Зона	3B3	ЦАЗ	BB3
Каталог			
ISC всего	17	62	59
Обработано только в ФИЦКИА РАН	5	56	43
% обработки ФИЦКИА РАН	29	90	73



Таким образом, анализ динамических и кинематических характеристик записей землетрясений хребта Гаккеля по данным островных арктических станций позволяет получать важные сведения о геодинамике, т.к. отражает разный механизм генерации событий. Несомненно, требуются дополнительные исследования при увеличении объема выборки, привлечения представлений о спектральном составе различных по механизму очага событий, сравнения с экспериментами на образцах и пр.

3.2.3 Уточнение строения литосферы Западного арктического сектора РФ

Рассмотрим возможность применения созданного инструмента (Архангельской сейсмической сети) для возможности уточнения строения литосферы Западного арктического сектора РФ. Современная сейсмология располагает огромным комплексом методов исследования строения литосферы, которые были не столь доступны 20 лет назад из-за отсутствия надлежащей высокочувствительной цифровой аппаратурной базы. Например, по методологии приемных функций receiver functions (*Vinnik, 1977; Бурмаков и др., 1983; Oreshin et al., 2002*) возможно существенно уточнить скоростные модели земной коры в местах расположения сейсмических станций. Такие работы проведены по следующим станциям Архангельской сети: КLM, LSH, PRM и ZFI, а также станции SPA0, расположенной на архипелаге Шпицберген (*Ваганова, 2012; Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Конечная, 2014; Vinnik et al., 2014*). Рассмотрим, как, исходя из аппаратурных возможностей, проводится обработка, какие геофизические результаты могут быть получены в связи с этим, какое необходимо оптимальное аппаратурное оснащение станций для этих исследований.

Исходными данными являются широкополосные трехкомпонентные записи телесейсмических землетрясений со всех азимутальных направлений с магнитудами > 5.8

с глубинами очагов до 300 км (Ваганова, 2012). Для выделения обменных волн и получения приемных функций выполняется ряд процедур, основными из которых являются: частотная фильтрация исходных записей; поворот осей и преобразование системы координат ZNE в LQT, где компонента L содержит падающую продольную волну P, ось Q содержит искомую обменную волну SV, T – тангенциальная компонента; затем – стандартизация с целью устранения различий в очаговых процессах и магнитудах путем операции деконволюции; получение индивидуальных приемных функций для каждого землетрясения; суммирование приемных функций от множества источников. Таким образом, для каждой сейсмической станции получены P-приемные функции, содержащие обменную волну Ps, полностью освобожденные от влияния источника, являющиеся только функцией приемника и характеризующие среду в подстанционной области.

Приемные функции рассчитываются для множества источников и суммируются со сдвигом по времени, результатом суммирования является так называемый стек, где на разных пробных глубинах выделяются сигналы от границ обмена. Очень важным параметром являются времена задержки, на которых обнаруживаются сигналы. В таблице 3.8 приведены сводные сведения по временам задержки от границ для нескольких районов (станций) севера Русской плиты в сопоставлении с аналогичными для Балтийского щита (группа SVEKALAPKO), Свальбардского поднятия (станция SPA0) и стандартной моделью IASP91.

Таблица 3.8 – Времена запаздывания обменных волн Ps относительно P волны в сопоставлении со стандартной моделью IASPEI91 для разных районов северной части Восточно-Европейской платформы

Kon crauuuu						
Код Станции	фундамент	Moxo	410 км	660 км	t(660) - t(410)	350 км
PRM	0.8	6.2	42.7	65.9	23.2	
KLM	0.6	4.3	42.4	66.5	24.1	
LSH	1.1	5.2	42.6	66.7	24.1	
ZFI	0.8	3.7		67.4		отрицательный импульс ~40 с
Группа SVEKALAPKO		6.0	42.3	66.2	23.9	
SPA0		3.2		67.9		
Модель IASPEI91		4.9	44.0	67.9	23.9	

Анализ таблицы 3.8 показывает, что времена запаздывания от границы Мохо имеют различные значения, что объясняется различной глубиной ее залегания в рассматриваемых районах. Малые времена задержки свидетельствуют либо о высоких скоростях в коре,

либо о неглубоком залегании Мохо, как, например, в районе архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген. Совместное обращение Р и S приемных функций позволило получить скоростные модели Vp и Vs до глубины 300 км, где как раз в районе архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген наблюдаются пониженные мощности земной коры *(Ваганова, 2016)*. Ранее Г.П. Аветисовым в работе *(Аветисов, Булин, 1974)* было отмечено, что на архипелаге Земля Франца-Иосифа по интерпретации волн Ps установлено уменьшение суммарной мощности всех слоев коры на 5–10 км при сохранении количества всех слоев, по сравнению с интерпретацией гравиметрических материалов и поверхностных волн. Относительно небольшая глубина залегания раздела кора-мантия (H=30 км) в районе пункта сейсмических наблюдений «Земля Франца-Иосифа» в сравнении с континентальной корой на севере ВЕП (мощность 34–40 км) может отражать растяжение земной коры *(Morozov et al, 2015)*.

Другим важным моментом является параметр задержки от границ 410 км, 660 км и t(660) - t(410) - время пробега обменной волны в зоне фазовых переходов в мантии. Времена задержки t_{ps} по данным сейсмической станции (с/с) «Климовская» (KLM) и с/с «Лешуконское» (LSH) практически совпадают с данными группы SVEKALAPKO в Южной Финляндии, но существенно меньше стандартных времен, поскольку для стандартной модели IASPEI91 принято считать t_{ps} (410 км)=44,0 с и t_{ps} (660 км)= 67.9 с.

Это позволяет нам говорить о том, что под северной частью Русской плиты скорости поперечных волн в верхней мантии на глубинах меньше 410 км имеют повышенные значения. Другими словами, верхняя мантия, подстилающая Север Русской плиты Восточно-Европейской платформы, является высокоскоростной. В переходной зоне между границами 410 км и 660 км разница во времени с моделью IASP91 для станций KLM и LSH составляет 24.1 с, что говорит о стандартной переходной зоне мантии на глубинах от 410 до 660 км. Под арктическими станциями ZFI и SPA0 обмены от границы 410 км не выделяются, это связано с особенностями переходной зоны континент-океан. В дополнение к ожидаемым фазам впервые на временах ~40 с под ZFI выделена промежуточная граница на глубине 350 км, не выделяемая ранее в подстанционных областях KLM и LSH. Это означает, что на глубинах 350 км имеется аномальное понижение скорости поперечных волн, вследствие серии фазовых переходов мантийных пироксенов и граната в мажорит и затем в ильменит, и эти переходы размазаны на очень широкий интервал глубин (*Пущаровский, Пущаровский, 1998; Jasbinsek et al., 2010; Oreshin et al., 2011*).

Особенностью приемных функций под станцией PRM является большое время запаздывания от Мохо, что может говорить либо о пониженных скоростях в коре, либо о

глубоком залегании границы Мохо. Не ясным пока остается и малое время пробега в зоне фазовых переходов в мантии, равное 23.2 с, при том, что стандартное время равно 23.9 с. Все эти вопросы будут решаться по мере продолжения исследований.

Таким образом, обобщая рассмотренные сведения о скоростном строении литосферы рассматриваемого района, получаем, что по данным обменных волн верхняя мантия, подстилающая Север Русской плиты Восточно-Европейской платформы (ВЕП), является высокоскоростной, а переходная зона в мантии стандартной.

Рассмотрим требования к пункту сейсмических наблюдений и сети в целом для решения задач изучения структуры земной коры и верхней мантии Западного арктического сектора РФ с построением скоростных моделей. Такими факторами являются: равномерность распределения станций на исследуемой территории, наличие широкополосных датчиков и соотношение сигнал/помеха для телесейсмических событий (не ниже 3) для уверенного выделения их на записи (используется нефильтрованный сигнал).

Как видно из рисунка 2.10 главы 2, пункты сейсмических наблюдений АСС распределены неравномерно и оснащены, в основном, короткопериодными датчиками (таблицы 3.1 и 3.9). Записи сейсмограмм этих приборов для некоторых станций характеризуется большим сейсмическим шумом (например, станция «Пермилово»), связанным с расположением станции в окрестностях транспортных узлов района. На фоне этого заметного шума весьма затруднительно проводить полный анализ записей волн от землетрясений, используемых для исследования скоростного строения среды. В таблице 3.9 приведены суточные спектры мощностей микросейсм для пунктов сейсмических наблюдений АСС. Примером влияния шумности сейсмической станции является сравнение данных для станции «Климовская», где с 2005 по 2011 гг. было отобрано 216 землетрясений, и станции «Пермилово», где за этот же период удалось отобрать только 83 землетрясения.

Как показывает наш опыт, в существующих условиях работы ACC минимальное отношение сигнал/помеха для отбора записей телесейсмических событий должна быть не ниже 3.2. Длительность накопления качественного материала с эпицентральных расстояний от 35^0 до 90^0 для построения скоростных моделей до глубин 300 км для материковых станций ACC составляет в среднем 5 лет, для островных – около 3 лет, значения магнитуд землетрясений от M> 5.5. Под эти требования подходят землетрясения, произошедшие в районах, представленных на рисунке 3.12.

Таблица 3.9 – Суточные спектры мощности микросейсм станций Архангельской сети в сравнении с кривыми (*Peterson*, 1993)

№ п/п	Наименование	Код станции	Тип датчика	Спектр мощности
1	2	3	4	5
1	Амдерма	AMDE	S	10 ¹¹ 10 ¹¹
2	Андозеро	ADZ	S	S(f), (wc)/гч EW 10 ⁻¹¹ NHNM 10 ⁻¹¹ Z 10 ⁻¹¹ NHLM 10 ⁻¹¹ 10 ⁻¹¹ 10 ⁻¹¹ 10 ⁻¹¹ 10 ⁻¹¹ 10 ⁻¹¹
3	Климовская	KLM	B, S	S(f), (wG) ^{3/F} U NHNM 10 ⁴⁰ 10 ⁴⁰ 1
4	Лешуконское	LSH	В	S(f), (wc) ² /Fu 10 ⁴⁰ 10 ⁴
5	Омега	OMEGA	В	S(f), (w/c) ³ /Tu NHNM 10 ⁻¹⁰ 10 ⁻¹⁰

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5
6	Пермогорье	PRG	S	10 NHNM EW 10 NHNM Z 10 NHLM I 10 10 1, fru
7	Пермилово	PRM	S	S(), (w/c) ² /Fu 10 ¹¹ 10 ¹³ 10 ¹³ 10 ¹⁴ 10 ¹⁴ 10 ¹⁵ 10 ¹⁶ 10 ¹⁷ 10 ¹⁸ 10 ¹⁹ 10 ¹⁹ 10 ¹⁹ 10 ¹⁹ 10 ¹⁹ 10 ¹⁹ 10 ¹¹ 10 ¹
8	Северная Земля	SVZ	В	10 ¹¹ 10 ¹¹ 10 ¹² 10 ¹³ 10 ¹⁴ 10 ¹⁴ 10 ¹⁵ 10 ¹⁶ 10 ¹⁶ 1
9	Земля Франца- Иосифа	ZFI	В	10 ¹¹ 10 ¹¹ 10 ¹² 10 ¹³ 10 ¹⁴ 10 ¹⁵ 10 ¹⁶ 10 ¹⁶ 10 ¹⁷ 10 ¹⁶ 10 ¹⁷ 10 ¹⁶ 10 ¹⁷ 10 ¹⁶ 10 ¹⁷ 10

Примечание: Тип датчика: S – короткопериодный, В - широкополосный



Рисунок 3.12 – Карта распределения землетрясений, используемых в методе receiver functions, для станций Архангельской сети KLM, LSH, ZFI

Таким образом, решение вопроса по уточнению глубинного строения Западного арктического сектора РФ может быть достигнуто, во-первых, увеличением количества стационарных станций, оснащением их широкополосными сейсмоприемниками (примеры приведены в гл. 2), во-вторых, дооснащением пунктов сейсмических наблюдений с короткопериодными сейсмоприемниками широкополосной аппаратурой и, в-третьих, проведение наблюдений на специально организованных временных сетях портативных широкополосных сейсмических станций. Также заделом на будущее является адаптация методики гесеiver functions для волновых форм, регистрируемых короткопериодными датчиками, как, например, это было сделано в работе (*Tomlinson et al., 2003*).

3.2.4 Улучшение локации сейсмических событий Западного арктического сектора РФ

Каждая из станций Архангельской сейсмической сети (ACC) имеет особенности в регистрации сейсмических событий. Например, сейсмические станции ZFI, OMEGA и SVZ (таблица 3.1) регистрируют в подавляющем большинстве землетрясения из арктического региона, в том числе слабые локальные землетрясения, происходящие на склоне континентального шельфа и сейсмические события, связанные с ледниковыми процессами. Станция AMDE – техногенные события из Воркутинского горнопромышленного узла, землетрясения из района Полярного Урала (например, землетрясения 24.12.2012 г. (Конечная и др., 2013) и 28.01.2014 г. (Носкова, Пономарева, 2014) и арктические

землетрясения с магнитудами выше 3.5. Станции сети, расположенные непосредственно на территории Архангельской области (KLM, LSH, ADZ, PRM, PRG) позволяют проводить сейсмический мониторинг континентальной части севера Север Русской плиты.

Большие расстояния между станциями (особенно между островными и континентальными) создают определенные сложности при обработке землетрясений. Достаточно часто бывают ситуации, когда землетрясение зарегистрировано только одной станцией АСС. Для обработки таких землетрясений стандартным подходом является привлечение времен вступлений объемных волн из каталогов других сейсмических служб, в т.ч. зарубежных, как пример, показанный на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 – Сейсмические записи станции «Амдерма» в сводной обработке арктического землетрясения 30 января 2013 t0=09:53:14.5

По нашему опыту ситуация, когда в каталогах других сейсмических служб, занимающихся мониторингом Европейского сектора Арктики, отсутствует информация о землетрясении, но на волновых формах некоторых станций оно присутствует, встречается достаточно часто. Это относится, во-первых, к слабым событиям (ML<3). Как правило, автоматические детекторы настроены на выделение землетрясений, которые регистрируются минимум тремя станциями, имеют магнитуду не больше указанного значения и др. методические особенности анализируемого сигнала. Во-вторых, слабые события, происходящие в восточной части рассматриваемого региона не регистрируются станциями, находящимися на удалении от эпицентра на расстоянии более 500 км. Эти факторы являются основными причинами отсутствия землетрясения в каталогах.

Особенность конфигурации АСС, нестабильность поступления данных с сейсмических станций на сервер лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН привело к применению нетривиального подхода обработки региональных и локальных

землетрясений Европейского сектора Арктики. Подробная методика, анализ ее эффективности изложен в работе (Конечная, 2015). Направления дальнейших исследований – анализ слабой сейсмичности и углубленное изучение природы и особенностей проявления региональной сейсмичности.

Одним из этапов решения данной задачи, в первую очередь локации событий, является построение региональных годографов для шельфовой зоны Западного арктического сектора РФ. Полученная скоростная модель (Morozov et al., 2016) в районе установки сейсмического пункта «Земля Франца-Иосифа» легла в основу регионального годографа NOES. Проведенный анализ ряда годографов: Sval, BARENTS, BARENTS3D и IASPEI91 позволяет утверждать, что при вычислении параметров землетрясений западной и центральной частей хребта Гаккеля, а также района архипелага ЗФИ наиболее эффективным является использование годографа NOES. В качестве примера на рисунке 3.14 приведены результаты локации землетрясений хр. Гаккеля при использовании годографа BARENTS, применяемого стандартно для локации событий выше 70° с.ш., и годографа NOES (*Конечная, 2015; Morozov et al., 2016*).



a – локация эпицентров землетрясений вычислена с использованием скоростной модели BARENTS; б – с использованием скоростной модели NOES

Рисунок 3.14 – Эпицентры землетрясений хребта Гаккеля (2011–2014 гг.), выделенные на записях пункта сейсмических наблюдений ZFI и обработанные с привлечением волновых форм сейсмических станций арх. Шпицберген. Эпицентры землетрясений отображаются вместе с комбинированными батиметрическими данными (<u>http://www.ngdc.noaa.gov</u>) (*Morozov et al.*, 2016)

Следующим этапом улучшения локации сейсмических событий является повышение чувствительности ACC, подразумевающая установку новых пунктов сейсмических наблюдений, в том числе на арктических архипелагах. Наиболее важными для повышения чувствительности ACC стали открытие пунктов сейсмических наблюдений на арх. Земля Франца-Иосифа и Северная Земля. Более подробно дорожная карта развития ACC показана в п. 3.4, наст. главы.

Результатом сотрудничества с ФГБУ «ААНИИ» стало открытие 21.11.2016 г. сейсмической станции «Северная Земля» с кодом «SVZ» на арх. Северная Земля (о. Большевик, мыс Баранова) (рисунок 2.8), координаты ее расположения: φ =79.276°N, λ =101.657°E, h=21 *м* (Антоновская и др., 2017). Опыт организации пунктов сейсмических наблюдений на арх. Земля Франца-Иосифа, позволил учесть особенности подготовки сейсмического бункера в арктических условиях (Данилов и др., 2013). Установлен широкополосный комплект оборудования СМG-6TD (Великобритания). Передача сейсмических данных с компьютера станции SVZ осуществляется путем их синхронизации на сервере ФГБУ «ААНИИ» через внутреннюю виртуальную сеть. Затем, данные с сервера ФГБУ «ААНИИ» синхронизируются через Интернет на сервере лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН, после чего они конвертируются и помещаются в архив.

B таблице 3.9 представлен характерный спектр мощности суточного микросейсмического фона станции SVZ. Записи характеризуются низким уровнем техногенных помех, что позволяет получать качественные сейсмические данные. Как было сказано выше, ML_{прел} для SVZ составляет 2.5. Региональные землетрясения регистрируются с магнитудами в диапазоне от 3.1 до 4.2, локальные – от 1.2 до 4.9. Сейсмические данные станции SVZ проанализированы за период с ноября 2016 г. по апрель 2017 г. Отмечены как телесейсмические землетрясения из разных районов земного шара, так и проявления региональной сейсмичности в Арктике. Всего зарегистрировано свыше 150 региональных землетрясений и 7 локальных событий (рисунок 3.15).

Региональные события. Обработка землетрясений проводилась с привлечением волновых форм других арктических станций в программном комплексе WSG, эпицентр определялся методом засечек (таблица 3.10). Рассматривались годографы NOES (*Morozov et al., 2016*) и BARENTS (*Kremenetskaya et al., 2001*), в итоге для данного района за основу был взят годограф BARENTS. Как видно из таблицы 3.10, региональные землетрясения приурочены к хребту Гаккеля, причем большее их количество приходится на восточную часть хребта. Несовершенство применяемого регионального годографа выше 85°N и

восточнее 65°E и одностороннее расположение станций смещают эпицентры землетрясений на южный борт хребта Гаккеля.







Дата	Время в очаге	φ, °N	λ, °E	h, км	ML	Район	Коды станций, привлеченных к обработке	Информация о событии в других каталогах
14.12.16	05:49:28.9	84.39	88.15	10f	3.2	хр. Гаккеля	SVZ, ZFI, OMEGA, SPA0	
15.12.16	05:38:52.5	84.63	10.04	10f	4.1	хр. Гаккеля	SVZ, ZFI, OMEGA, SPA0	NORSAR
18.12.16	06:10:46.1	85.94	42.44	10f	3.9	хр. Гаккеля	SVZ, ZFI, OMEGA, SPA0	NORSAR
18.12.16	09:09:23.8	86.00	48.46	10f	3.4	хр. Гаккеля	SVZ, ZFI, OMEGA, SPA0	
08.01.17	08:18:15.8	84.42	98.43	10f	3.5	хр. Гаккеля	SVZ, ZFI, OMEGA, SPA0	
16.01.17	09:26:27.9	84.79	91.05	10f	3.4	хр. Гаккеля	SVZ, ZFI, OMEGA, SPA0	
07.04.17	22:41:46.6	84.59	97.46	10f	4.2	хр. Гаккеля	SVZ, OMEGA, SPA0, KBS, LSH, KLM	IDC, GS RAS
08.04.17	00:46:29.7	84.42	98.82	10f	4.2	хр. Гаккеля	SVZ, OMEGA, SPA0, KBS, LSH	IDC, GS RAS
08.04.17	00:49:30.5	84.36	98.91	10f	3.8	хр. Гаккеля	SVZ, OMEGA, SPA0, KBS, LSH	IDC
08.04.17	00:56:56.0	84.39	98.47	10f	4	хр. Гаккеля	SVZ, OMEGA, SPA0, KBS, LSH	IDC, GS RAS
08.04.17	00:58:55.5	84.44	100.07	10f	3.1	хр. Гаккеля	SVZ, OMEGA, SPA0	IDC

Таблица 3.10 – Параметры региональных землетрясений

На данный момент существует проблема обработки подавляющего большинства региональных землетрясений, зарегистрированных станцией SVZ (более 120 событий с ML<3.0). Информация об этих событиях не отражена в каталогах мировых и отечественных сейсмологических служб, а также не выделяются на исходных записях других станций ACC. Предварительная обработка региональных землетрясений по данным одной станции SVZ не дает надежного расчета азимутального направления. Таким образом, обработка таких событий позволяет только ориентировочно определить наиболее вероятные районы их локации: восточная часть хребта Гаккеля, континентальный шельф – прогиб Лаптевых-Гаккеля и Южно-Таймырская зона.

Возможно, привлечение в дальнейшем данных сейсмических станций, установленных на Ямале (Виноградов, Пятунин, 2017), позволит учитывать такие события в геодинамических исследованиях.

Локальные события. За указанный выше период наблюдений станцией SVZ зафиксировано 7 локальных землетрясений с разных эпицентральных расстояний. Записи событий хорошего качества, вступления четкие, выделяются по исходному сигналу. Сложность заключается в том, что из 7 зарегистрированных событий только два удалось обработать согласно стандартным правилам обработки (минимум 3 станции) (таблица 3.11). Остальные 5 землетрясений обрабатывались в программе КоФ ФИЦ ЕГС РАН Event Locator (EL) по данным одной станции SVZ. Распределение полученных эпицентров показано на рисунке 3.15, а их параметры приведены в таблице 3.11.

Дата	Время в очаге	φ, °N	λ, °E	h, км	ML	Район	Коды станций, привлеченных к обработке
29.11.16	01:55:55.5	81.16	70.83	5f	3.0	Желоб Святой Анны	SVZ, ZFI, OMEGA
10.12.16	03:00:23.6	81.06	104.14	5f	1.5	Шельфовая окраина	SVZ
10.01.17	01:26:36.5	80.59	92.82	5f	2.1	Северная Земля	SVZ
*11.01.17	07:43:09.2	77.96	96.70	5f	4.9	Северная Земля	SVZ, ZFI, OMEGA, SPA0, ARA0
07.03.17	17:10:17.5	79.73	99.68	5f	1.9	Северная Земля	SVZ
13.03.17	08:56:28.7	76.96	96.32	5f	1.7	о. Русский (вблизип-ва Таймыр)	SVZ
19.03.17	19:48:48.7	79.74	100.35	5f	1.2	Северная Земля	SVZ

Таблица 3.11 – Параметры локальных землетрясений

* информация о землетрясении есть также в каталоге IDC

На рисунке 3.16 приведен пример обработки локального землетрясения, произошедшего 11.01.2017 г., t0=07:43:09.2, ML=4.9. К обработке приняты исходные записи с четким вступлением объемных волн. Кроме арктических станций Архангельской

сети, были привлечены волновые формы со станций арктических групп NORSAR (ARA0, SPA0). Информация об эпицентре этого землетрясения содержится в международном центре IDC. Обработка в IDC проведена по данным 14 сейсмических станций, t_0 =07:43:04.4, ML=4.1, m_b=3,6. Разница во времени в очаге между обработкой ACC и IDC составила 4.4 с, и 0.14°, что, в данном случае, можно считать хорошей сходимостью результатов. Эпицентр землетрясения уверенно ложится в зону взбросо-надвигового фронта Большевик, главная фаза формирования которого проходила примерно в карбоне, а дополнительная — в мезозое (*Малышев и др., 2012*). Таким образом, выявленная сейсмическая активность этого района свидетельствует о продолжении формирования этих процессов.



Рисунок 3.16 – Волновые формы и фрагмент обработки землетрясения вблизи арх. Северная Земля 11.01.2017 г.

Согласно каталогу ISC, в районе арх. Северная Земля с 1990 по 2014 гг. зарегистрировано 8 землетрясений с магнитудами выше 4.0, одно землетрясение лоцировано в том же районе станциями Архангельской сейсмической сети с привлечением зарубежных данных в 2016 г. (ML=3.8) (рисунок 3.15). События лоцированы в желобе Св. Анны, на границе взбросо-надвигового фронта Большевик (арх. Северная Земля) и на шельфовой окраине. Сопоставление полученных эпицентров с историческими данными ISC свидетельствует о том, что пространственное распределение землетрясений вписывается в выделяемые сейсмоактивные структуры района архипелага (*Nikishin, Malyshev, Petrov, 2014*) – крупный складчатый пояс – взбросо-надвиговый фронт Большевик и Кружилихинскую зону (рисунок 3.15). Таким образом, представлены первые результаты работы сейсмической станции SVZ, которые, несмотря на короткий период анализируемого материала (5.5 месяца), позволяют дополнить общую картину Арктического региона новыми сведениями об его сейсмической активности и внести вклад в представления о формировании Северо-Карского осадочного бассейна.

Подведем итог качеству Архангельской сейсмической сети как инструменту, применяемому для решения различных задач сейсмологии:

1. Созданная конфигурация сети позволяет регистрировать землетрясения в Западном арктическом секторе РФ со значениями представительной магнитуды от 2.7 до 3.5. Точность регистрируемых событий зависит от района, в котором произошло землетрясение и варьируется от 5 до 8 км для Беломорского региона и до 27-53 км для хребта Гаккеля.

2. Применяя метод приемной функции, ценные сведения о глубинах Земли можно извлечь по наблюдениям даже отдельных широкополосных станций.

 Арктические пункты сейсмических наблюдений АСС позволяют получать новую информацию о сейсмической активности континентального шельфа и срединноарктических хребтов.

Конечно, инструмент не лишен изъянов, касающихся качества и количества установки пунктов сейсмических наблюдений, типов регистрирующей аппаратуры, необходимости уточнения методик по расчету ряда параметров и пр. Тем не менее, существующие пробелы это задачи следующего этапа по усовершенствованию функционирования инструмента.

3.3 Связь сейсмичности, аномалий теплового потока с геотектоникой Баренцевоморского региона. Сейсмотектоническое структурирование

Этот раздел представляет возможности использования накопленных данных сейсмического мониторинга не только для понимания геодинамики региона, но и как попытку разделения территории на зоны, существенные для планирования промышленного освоения.

Европейский сектор Арктики является частью геодинамической системы, включающей древний Евразийский материк и активно развивающийся более молодой Северный Ледовитый океан. Значительный объем накопленного геолого-геофизического материала выявляет сложное и изменчивое в пространстве строение земной коры и верхней мантии в Баренцевоморском регионе (*Юдахин, Щукин, Макаров, 2003; Верба,*

2007; Артюшков, 2010; Сим, Жиров, Маринин, 2011; Кашубин и др., 2013; Лаверов и др., 2013; Artyushkov et al., 2014; Сорохтин и др., 2016). До сих пор продолжаются дискуссии об особенностях формирования литосферы, причинах изменения ее мощности и «исчезновения» под глубокими впадинами гранито-гнейсового слоя (Кашубин и др., 2013;, Artyushkov et al., 2014).

Новые возможности, создаваемые принятой стратегией развития сейсмических наблюдений (п. 2.2 гл. 2), покажем на примере уточнения геодинамики рассматриваемого региона. За основу была взята схема тектонического районирования Баренцево-Карского шельфа, составленная Ступаковой А.В. по материалам Н.А. Богданова, В.Е. Хаина (1996), E.E. Милановского (1987, 1991), В.С. Суркова (2000), А.Э. Конторовича и др. (2010), О.И. Супруненко (1990), В.А. Скоробогатова и др. (2003), Н.И.Тимонина (1998), А.Я. Рудкевича (1986), М.Л. Вербы и др. (2001, 2007), А.П. Каленича и др. (2004), Е.А. Кораго и др. (1992), В.Н. Мартиросяна, Е.А. Васильевой (2004), Б.В. Сенина и др. (1989), Э.В. Шипилова, Тарасова Г.А. (1998), С.И. Шкарубо, Э.В. Шипилова (2007), В.И. Шпильмана (1998), И.С. Грамберга (1988), Н.А. Малышева (2002), R.G. Gabrielsen (1990), S.E. Johansen (1994), A.V. Stoupakova et al. (2011) (Ступакова, 2011), из которой нами были выделены крупные надпорядковые структуры и некоторые поднятия. Схема дополнена информацией по грабенам и некоторым разрывным нарушениям из (Атлас природных и техногенных опасностей..., 2011; Arctic Petroleum Geology, 2011). Нами проведено сопоставление схемы тектонического районирования с нашими результатами по построению новой карты сейсмичности: пространственным распределением землетрясений за 2000-2015 гг. (Антоновская и др., 2018) и представлений о физике процессов в отдельных районах, детально описанных выше. Совокупный анализ полученной информации позволяет выделить следующие особенности (рисунок 3.17):

1. Активизация сейсмичности сводово-блокового поднятия Свальбардского архипелага (Шпицберген), архипелага Земля Франца-Иосифа и поднятия Белый вызвана тектоническими процессами, при которых, в соответствии с (*Верба, 2007; Сорохтин и др., 2016*), развиваются морфоструктуры растяжения и сжатия.

2. Растяжение окраины континентального шельфа и его удлинение в желобах Франц-Виктория, Святой Анны и Орли (*Верба, 2007; Сорохтин и др., 2016*) отражается в виде слабой сейсмичности с диапазоном значений магнитуд землетрясений ML от 0.6 до 4.9. Прослеживается четкая приуроченность эпицентров землетрясений к отрицательным морфоструктурам континентального склона. В районе желобов эпицентры землетрясений расположены также неравномерно и тяготеют к их устьевым частям (*Конечная, 2015; Могоzov et al., 2015*).



1 – депрессии: а – Центрально-Баренцевская; б – Северо-Баренцевская; 2 – платформенные массивы: а – Свальбардская антеклиза, б – Печорская плита, в – Северо-Сибирский порог; 3 – краевые прогибы: а – прогиб Седова; б – Коротаихинская впадина; в – Косью-Роговская впадина);
4 – склоны сверхглубоких депрессий: а – Восточно-Баренцевская зона ступеней; б – Южно-Баренцевская зона ступеней; в – Кольская моноклиналь; г – Восточно-Новоземельская моноклиналь; д – Восточно-Новоземельская зона ступеней; б – Северо-Сибирский кряж; б – Северо-Сибирская зона ступеней; 5 – Байкальская складчатость: а – Тиманский кряж; б – Пайхойский кряж; б – Северо-Карская синеклиза; 7 – Скандинавская складчатость каледонского возраста; 8 – Лунинская седловина; 9 – Новоземельская; СБ – Северо-Баренцевская; ЮК – Южно-Карская; 11 – границы пришельфовых и неклассифицированных разрывных нарушений; 12 – крупнейшие разломы, сдвиги и надвиги; 13 – активный спрединговый центр; 14 – надпорядковые структуры; 15 – сейсмические события за 1998–2015 гг.; СА – желоб Святой Анны; ХО – Хипопен–Ольгинский желоб; ФВ – желоб Франц-Виктория; О – трог Орли

Рисунок 3.17 – Современная сейсмичность на карте основных структурно-тектонических элементов Баренцевоморского региона по данным (Ступакова, 2011; Arctic Petroleum Geology, 2011)

3. Отдельные слабые землетрясения выявлены на границах тектонических структур в Центрально-Баренцевской впадине (район норвежского шельфа) и в складчатой зоне каледонид Скандинавского полуострова.

4. Единичные сейсмические события зарегистрированы на склонах сверхглубоких депрессий, это – Восточно-Баренцевская и Южно-Баренцевская зоны ступеней, землетрясения 23.01.2012 (t0=09:52:55.0, lat 80.11, lon 72.71, ML=2.7) и 20.11.2015 (t0=15:43:17.49, lat 71.18, lon 32.48, ML=2,4) соответственно, и два события в Кольской моноклинали 05.11.2002 (t0=07:31:16.22, lat 70.17, lon 34.25, ML=1.6) и 02.11.2000 (t0=08:14:24.61, lat 70.12, lon 36.56, ML=1.1).

5. Сейсмические события зафиксированы в краевой восточной части Баренцевоморской плиты в Новоземельской складчатости и прогибе Седова. Примером являются два события на Новой Земле, которые произошли 11.10.2010 (t0=22:48:29, lat 76.18, lon 63.94, ML=4.5) и 4.03.2014 (t0=04:42:36, lat 74.72, lon 56.72, ML=3.3) (Конечная, 2015; Gibbons et al., 2016).

Из различных источников (Davies, Davies, 2010; Хуторской и др., 2013; The Global Heat Flow Database) нами была создана база данных значений теплового потока. В таблице 3.12 представлена сводная информация о сейсмичности и тепловом потоке в выделенных тектонических структурах (рисунок 3.17) для исследуемого региона: платформенных и океанических.

Корреляция сейсмической активности со значениями теплового потока прослеживается в районах СОХ. Для северной части Восточно-Европейской платформы явной зависимости между этими параметрами не наблюдается, за исключением Северо-Баренцевской зоны поднятий.

Таким образом, пространственное распределение землетрясений отражает действие, во-первых, спрединговых процессов, в том числе трансформных перемещений. Кроме того, сейсмичность является результатом полей тектонических напряжений, генерируемых непосредственно в краевых частях Баренцевоморской плиты, при этом в центральной её части зафиксированы единичные события. Следует отметить, что в местах расположения/захоронения особо ответственных природно-технических объектов и в районах углеводородных месторождений в Баренцевом и Карском морях также отмечается сейсмическая активность (рисунок 1.3).

Таблица 3.12 – Показатели значений сейсмичности и теплового потока в выделенных тектонических структурах рассматриваемого района Арктики

	Структуры	5	Вемлетряс	Средние значения	
Надпорядковые структуры	Структуры I и II порядка	Кол- во	ML _{max}	ML _{cp}	теплового потока, мВт/м ²
	Центрально–Баренцевская депрессия (1а)	23	3.6	2.48	60-70
	Северо–Баренцевская депрессия (1б)	2	2.7	2.4	60-80
	Северо-Баренцевская зона поднятий (2а)	1758	5.9	2.5	60-80,
	трог Орли (исключение)				100-300
Баренцевская плита	прогиб Седова (За)	2	2.3	2.25	50-80
	Восточно – Баренцевская зона ступеней (4а)	1	2.7	2.7	70
	Лунинская седловина (8)	-	-	-	70
	Южно-Баренцевская зона ступеней (4б)	9	3.7	2.37	60-70
	Кольская моноклиналь (4в)	2	1.6	1.35	50-60
	Печорская плита (2б)	-	-	-	40-50
Turner Herren erren	Коротаихинская впадина (3б)	-	-	-	40
Тимано-печорская плита	Косью-Роговская впадина (Зв)	-	-	-	30-40
	Тиманский кряж (5а)	-	-	-	50
	Южно-Карская синеклиза (6а)	1	4.1	4.1	70
Pararua Cucurana aruma	Восточно-Новоземельская моноклиналь (4г)	-	-	-	60
Западно-Сибирская плита	Восточно-Новоземельская зона ступеней (4д)	-	-	-	60
	Северо-Сибирская зона ступеней (4е)	-	-	-	60
Новоземельская микроплита	Новоземельская складчатость раннекиммерийского возраста (9)	5	4.5	3.24	60
	Пайхойский кряж (5б)	-	-	-	60
	Северо-Сибирский порог (2в)	1	2.7	2.7	60-70
Северо-Карская плита	Северо-Карская синеклиза (6б)	-	-	-	70
Балтийский щит	Скандинавская складчатость каледонского возраста (7)	33	2.8	1.9	40-50
Евразийский и Северо-	Котловина Нансена	135	4.3	2.5	60-80
Атлантический бассейны	COX	3224	6.6	2.83	>100

На основании характерных геодинамических процессов, присущих территориям, и типам сейсмических событий (рисунки 3.6 и 3.17) нами составлена карта-схема сейсмотектонического структурирования Баренцевоморского региона и прилегающих областей (рисунок 3.18). Для землетрясений севера Русской плиты и Белого моря выполнен теоретический расчет максимально возможной интенсивности событий (таблица 3.13) с использованием уравнения макросейсмического поля (зависимость Шебалина Н.В.), применяемое для платформенных территорий *(Сейсмическая сотрясаемость..., 1979)* в виде

 $I = 1.5MS - 3.5\log R + 3.0 \tag{3.1}$

где *R* – расстояние от гипоцентра землетрясения до точки наблюдения, диапазон возможных глубин представлен в (*Морозов и др., 2018*).



Процессы: 1 – рифтогенез; 2 – зона активного осадконакопления с проявлением глубинных тектонических процессов, связанные с трансформными разломами хребта Гаккеля; 3 – изостатическая компенсация лавинного осадконакопления; 4 – новейшая тектоническая активность.

Зоны с сейсмической интенсивностью в баллах по ОСР-2015-С: 5 – 5 баллов, 6 – 6 баллов, 7 – 7 баллов.

8 – техногенные районы; 9 – зона, требующая дополнительных исследований

Рисунок 3.18 – Сейсмотектоническое структурирование Баренцевоморского региона и прилегающих областей

Дата	Время	Широта	Долгота	М	R, км	Imax	Район
21.10.1991	04:47:11.0	65.48	42.01	2.9	2.9	6.3	ВЕП
26.12.1996	04:44:10.6	63.26	45.24	3.4	3.7	6.7	ВЕП
25.02.2002	18:38:09	63.55	47.23	3.3	5-7	5.8	ВЕП
22.10.2005	17:46:44.8	64.49	40.95	2.9	2.7	5.8	ВЕП
07.10.2012	03:43:12.9	66.21	47.84	1.1	6-8	1.9	ВЕП
28.03.2013	07:02:16.2	63.95	41.57	3.4	7-9	5.4	ВЕП
23.07.2006	01:32:08.8	66.00	39.58	1.7	1.4	5.0	Белое море
20.03.2014	13:56:40.7	64.87	35.52	0.7	0.7	4.6	Белое море
25.05.2016	04:46:00.7	66.04	35.66	2	6.5	3.2	Белое море
27.02.2004	10:34:00	64.02	38.06	2.1	2.0	5.1	Карьер
21.02.2005	12:43:24	62.56	39.70	2	8.5	2.7	Карьер
16.03.2005	13:32:41	62.96	40.13	2.3	1.5	5.8	Карьер

Таблица 3.13 – Параметры землетрясений

Цвета согласно ОСР-2015-С: желтый – 7 баллов, зеленый – 6 баллов, светло-зеленый – 5 баллов

Кроме этого, сделана попытка оценить интенсивность воздействий на сооружения при производстве взрывных работ для ряда карьеров Архангельской области (таблица 3.13). В расчетах использовались сильные взрывы, *R* в уравнении (3.1) – расстояние до ближайшего населенного пункта. В приложении А приведены параметры воздействий природной и техногенной сейсмичности на ряд сооружений севера Русской плиты.

В настоящее время в основе проектирования ответственных объектов лежит карта OCP-2015-С (СП 14.13330.2014), хотя есть и комплект карт OCP-2016 (Уломов, и др., 2016). Существенно, что карты OCP затрагивают только сушу, для морских (в том числе шельфовых) территорий, освоение которых уже начато и на территории которых зафиксированы землетрясения, оценке сейсмической опасности уделено недостаточно исследований. Заметим, что районирование морских территорий присутствовало в картах OCP-97, в качестве примера приведен фрагмент карты OCP-97-C на рисунке 3.19. К тому же, существующие нормативы в области проектирования морских сооружений, например (ГОСТ Р 57123-2016), опираются на имеющуюся информацию о сейсмичности региона, которая практически отсутствует для арктических морей, в результате происходят аварии из-за недостаточной проработки этого вопроса (пример см. в гл. 1).

Тем не менее, анализ таблицы 3.13 показывает, что рассчитанная нами максимальная сейсмическая интенсивность соответствует карте OCP-2015-С (для учтенных в ней территорий). Отметим, что уравнение (3.1) требует актуализации, как, например, это было сделано в работе (Дягилев, 2017) при получении уточненных оценок сейсмической

опасности в горнодобывающих регионах, но в силу редкой сети сейсмических наблюдений в районах Крайнего Севера эта задача пока остается не решенной.



Рисунок 3.19 – Фрагмент карты ОСР-97-С

Таким образом, показана возможность проведения сейсмотектонического структурирования Баренцевоморского региона и прилегающих областей на основании анализа слабой природной и техногенной сейсмичности, подключения представлений о геодинамике региона. Нацеленность мониторинга на определение воздействий на сооружения показывает перспективность подхода, практическим применением которого является использование результатов при актуализации карт ОСР.

3.4 Развитие сети сейсмического мониторинга в арктическом регионе

Проведем теоретические расчеты магнитудной чувствительности регистрируемых событий Западного арктического сектора РФ до функционирования АСС, с учетом ее нынешней конфигурации и с реализацией наших планов открытия новых пунктов сейсмических наблюдений. По методике д.ф.-м.н. В.Ю. Бурмина в программе MinMag (ИФЗ РАН) были построены карты теоретических значений минимальных магнитуд для каждого случая (рисунок 3.20).

Анализ рисунка 3.20а показывает, что при отсутствии АСС мониторинг западной части рассматриваемого региона должен осуществляться с М_{min}=2.0. Из области мониторинга «выпадают» слабые землетрясения, происходящие в районе арх. Новая Земля, арктических желобов, границы континентального шельфа и пр., анализ которых

позволяет получить новые знания о современных геодинамических процессах шельфовых областей. Как показывает практика (Виноградов и др., 2012), станции, расположенные на Шпицбергене и на Кольском полуострове ведут сейсмический мониторинг с M_{min}=3.0, что отличается от полученных теоретических значений и объясняется индивидуальными условиями установки станций, настройками программного обеспечения и пр. методическими особенностями.



Желтые треугольники – сейсмические станции других сетей, зеленые треугольники – станции УНУ «АСС», голубые треугольники – планируемые места установки сейсмических станций

Рисунок 3.20 – Теоретические расчеты минимальных магнитуд землетрясений Европейского сектора Арктики до (а) и после (б) создания Архангельской сейсмической стеи, и с учетом открытия ряда сейсмических станций в Российской Арктике (в)

Существующая конфигурация АСС практически полностью «покрывает» восточную часть Западного арктического сектора РФ (рисунок 3.20б). Использование в совместной обработке данных станций других сейсмических служб, функционирующих в Арктике, позволяет охватить всю зону Европейского сектора Арктики, при этом M_{min} =2.0 для всего региона. Выпадают территории, расположенные восточнее арх. Новая Земля и арх. ЗФИ, в том числе граница континентального шельфа и зона срединно-океанических хребтов, что можно нивелировать установкой дополнительных станций.

Для теоретических расчетов подбирались районы, в которых существует реальная возможность создания пунктов сейсмических наблюдений, в результате этого для всего региона M_{min}=1.8 (рисунок 3.20в). Придерживаясь концепции дорожной карты, осуществляется возможность мониторинга центральной Баренцевоморской зоны, которая согласно рисунку 3.17 требует дополнительных исследований.

Подобная конфигурация сети, даже при такой минимальной плотности станций в Западном арктическом секторе РФ, открывает возможность применения следующих современных сейсмологических методов, нацеленных на исследование литосферы арктической зоны РФ:

 методы сейсмической томографии, которые позволяют оконтурить скоростные неоднородности масштабом в несколько сотен километров по площади. При этом можно рассчитывать на выделение в разрезе высокоскоростной литосферы и низкоскоростной астеносферы, в результате чего появляется возможность оконтурить высокоскоростные блоки мантии и активизированные низкоскоростные.

- построение приемных функций продольных и поперечных волн и их совместное обращение позволит получить детальные скоростные разрезы для районов расположения сейсмических станций. Эти модели дают возможность детально охарактеризовать структуру литосферы и астеносферы, выделить зоны частичного плавления, определить структуру коры для продольных и поперечных волн. Совместное использование этих типов волн дает возможность охарактеризовать вещественный состав среды, что невозможно сделать с одними продольными волнами.

Таким образом, конфигурация сети, представленная на рисунке 3.20в, позволит существенно дополнить имеющиеся отрывочные данные о структуре земной коры и верхней мантии Российской Арктики, получить основу для связи пространственновременных закономерностей сейсмичности со структурой литосферы, а также повысить детальность карты сейсмического районирования с возможным распространением ее на морские акватории.

Выводы

Благодаря установке ряда сейсмических станций в Арктике, расширена география мониторинга Западного арктического сектора РФ – обеспечено наблюдение до 100° в.д. Этот факт позволяет снизить представительную магнитуду регистрации сейсмических событий для данного региона до М_{пред} 2.7-3.5.

Следующим этапом является установка необходимого минимального количества сейсмических станций в местах, представленных на рисунке 3.18, что позволит регистрировать события с М_{min}=1.8 и получить инструмент наблюдения за геодинамическим режимом в районах разведки и добычи энергетических сырьевых ресурсов Западной арктической зоны РФ. В качестве результата можно ожидать: усовершенствование скоростных сейсмических моделей, создание карты новейшей сейсмической опасности, повышение чувствительности систем мониторинга по выявлению ЧС природного и техногенного характера.

Результаты мониторинга геодинамического режима могут быть полезны таким ведомствам как ГУ МЧС, Минобороны, Минприроды, а также Роснефть и Арктикуголь.

4 Сейсмический мониторинг состояния плотин ГЭС и гидроагрегатов

Концепция проведения в едином комплексе сейсмического мониторинга ответственных объектов совместно с территориями их размещения иллюстрируется на примере ее реализации для гидротехнических сооружений как объекта, безопасность которого зависит от геологической среды, состояния конструкций и работы агрегатов.

4.1 Сводка основных опасных природных явлений и техногенных процессов

Перечислим ряд факторов, оказывающих негативное влияние на состояние гидротехнических сооружений (ГТС), на основании обобщения ряда материалов (Капустян, Юдахин, 2007; Марчук, Марчук, 2006; Марчук, Манько, 2010; Договор № 1– 407–1508/ОГ–175–13–2013; Научно-технический отчет..., 2017; база нормативных документов и публикаций ICOLD и ряд др.).

1. Геодинамические процессы в основании плотины:

 субъективные факторы, в том числе ошибки проектирования, недостаточность изысканий, недостаточный учет свойств скального основания и/или сейсмичности региона, неверные проектные решения;

 изменение физико-механических и фильтрационных свойств состояния пород в основании и в районе сооружения и связанное с этим изменение напряженнодеформированного состояния (НДС) сооружения, в частности, увеличение противодавления, уменьшение фильтрационной прочности основания;

 наличие быстрых и медленных (криповых) движений тектонических блоков и связанные с этим изменения в статической схеме работы сооружения, вызванная этим работа сооружений в непроектном режиме;

 увеличение сейсмичности района возведения плотины после заполнения водохранилища (возбужденная сейсмичность);

природные и техногенные (взрывы) сейсмические события;

 вызванные тектоническими и сейсмотектоническими движениями оползнеобвальные явления в районах береговых врезок плотины и в берегах водохранилища и нижнего бьефа, действие аномальных паводков.

2. Динамические воздействия вследствие работы эксплуатационных водосбросов.

3. Динамические воздействия от работы гидроагрегатов (ГА).

Динамические воздействия от работы гидроагрегатов условно можно разделить на нагрузки, обусловленные непосредственно работой самого агрегата, и сопутствующие гидродинамические нагрузки. К первой группе относятся воздействия, обусловленные вращением рабочего колеса турбины (оборотная частота), воздействия, генерируемые самим рабочим колесом с частотой, соответствующей частоте прохождения лопастей мимо определенной точки камеры (лопастная частота), низкочастотные пульсации, возбуждаемые в отсасывающей трубе («жгутовая» частота), высокочастотные пульсации, вызванных образованием отрывных вихрей – дорожки Кармана.

Гидротехнические сооружения относятся к объектам, где некоторые незначительные повреждения сооружения или грунтов основания могут привести к катастрофическому развитию аварийной ситуации. Примером может служить практически полное разрушение бетонной арочной плотины «Мальпассе» (Barrage de Malpasset) 02.12.1959, построенной на р. Рейран, южная Франция, вызванное подвижкой в разломе скального основания в левой части бортового примыкания вследствие заполнения водохранилища в конце ноября 1959 (Chanson, 2004; 2009). Город Фрежюс подвергся практически полному затоплению, по официальным данным погибло более 300 человек. Надо отметить, что бетонные арочные плотины считаются наиболее устойчивыми (по эпюре сжатия) и, кроме того, проектируются с опиранием на скальное основание. Гравитационные плотины, к примеру, напротив, являются менее устойчивыми, т.к. сопротивляются давлению воды только благодаря собственному весу, при этом дефекты в основании могут играть важную роль в устойчивости плотины. Авария на плотине «Мальпассе» вызвана низким качеством проведения инженерно-геологических исследований на стадии выполнения изысканий, а также недостаточным объемом знаний (на тот момент) в области наведенной сейсмичности, масштабные исследования которой были начаты позже (Adams, Asghar Аhmed, 1969; Гупта, Растоги, 1979; Капустян, Юдахин, 2007; Gahalaut et al., 2007; Мирзоев и др., 2009; Ташлыкова, 2010 и многие др.).

За более короткий срок, в результате размыва грунта под основанием машинного зала из-за фильтрационного продавливания воды из нижнего бьефа станции в верхний, произошла аварийная осадка Загорской ГАЭС-2 в сентябре 2013 г. (Пресс-служба ПАО «РусГидро»). Причиной аварии снова является недостаточный объем инженерногеологических изысканий, которые были проведены в конце 90-х гг. прошлого века, и недостаточность системы мониторинга за состоянием сооружения и грунтами основания.

Отметим, что многие негативные факторы можно взять под контроль путем создания ориентированной на их выявление системы сейсмического мониторинга. Рассмотрим в

деталях возможности такой системы для обследования гидротехнических сооружений (ГТС) и гидроагрегатов (ГА).

4.2 Контроль гидротехнических сооружений. Нормативные документы

В настоящее время диагностика состояния ГТС и ГА ГЭС основывается на прямых измерениях параметров, характеризующих опасные процессы (например, перемещения плотины, вибрация ГА и пр.). Разнообразные датчики устанавливаются непосредственно на контролируемом объекте в точках, наиболее «информативных» с точки зрения получения данных для контроля заданных параметров. Помимо очевидного недостатка такого подхода – необходимости установки и обслуживания большого количества контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), имеется проблема доступности точек измерения. Например, тензометрические датчики устанавливаются в основном на этапе строительства и в дальнейшем не могут быть отремонтированы и поверены. Возможна и ситуация, когда в процессе эксплуатации в сооружении развиваются процессы, для понимания которых необходимы были бы измерения в точках, где установка измерительной аппаратуры не была предусмотрена изначально. При этом явления, которые нельзя измерить «напрямую», а выявить после обработки или привлечения закрепления плотины в бортах примыкания (примеры рассмотрены ниже).

Развитие вычислительной и измерительной техники, методов математического моделирования позволят оптимизировать количество точек наблюдения и, соответственно, затраты на обслуживание КИА. Переход от прямых к косвенным измерениям, особенно в системах диагностики состояния опасных и особо опасных объектов, требует:

- проверки адекватности расчетной модели;

 – определения необходимой точности расчетов при наличии ограничений в вычислительных ресурсах;

- математического моделирования аварийных ситуаций.

Диагностика состояния объекта с использованием математической модели при ограничении объема собираемой измерительной информации является общей тенденцией как в России, так и в других странах. При этом предполагается, что по акселерограмме зарегистрированного сейсмического события в районе плотины с использованием математической модели можно рассчитать реакцию сооружения и вероятность образования повреждений, например как в работах (*Аськов, 1983; Zhenzhong et al., 2012; Kato et al., 2016; Кузьмин, 2016*).

В настоящее время наибольшее распространение получила методика периодической так называемой «калибровки» математической модели с привлечением большого количества датчиков, временно устанавливаемых на плотине. При этом для определения динамических характеристик сооружения используются как искусственные методы возбуждения колебаний (дебалансные машины), так природные или техногенные микросейсмические колебания. Исследования проводятся при минимальном и максимальном уровнях верхнего бьефа (УВБ) с периодичность раз в несколько лет. При этом создание адекватной математической модели является определяющим для выполнения всей работы.

Вибрационный мониторинг железобетонных сооружений и оборудования ГЭС осуществляется для контроля их технического состояния и работоспособности, а также диагностики повреждений и оценки скорости изменения состояния плотины и гидроагрегатов, используются амплитудно-частотные характеристики их колебаний совместно с грунтовым основанием. Как правило, решение задач диагностики повреждений, например, определения расположения и глубины трещин, оценки состояния зоны контакта плотины и грунтового основания и т.п. требует предварительного решения задачи верификации конечно-элементной модели конструкции. Классификация методов мониторинга и диагностики повреждений включает четыре уровня диагностики:

1. Контроль выполнения условий нормальной эксплуатации и регистрация наличия повреждений при их возникновении.

2. Определение зоны, где расположены повреждения.

3. Оценка серьезности повреждений.

4. Оценка остаточного ресурса конструкции.

Для анализа повреждений, как правило, используются критерии изменения частот и форм собственных колебаний. Знание частот и форм собственных колебаний «неповрежденной» модели необходимо и для решения задачи идентификации ее механических характеристик. Для экспериментального определения частот и форм собственных колебаний как конструкции с повреждениями, так И условно «неповрежденной» конструкции в последние годы развит широкий спектр методов. Примеры: методы, основанные на использовании измерений колебаний, возникающих или в различных эксплуатационных режимах, или при сейсмических воздействиях и не требующих использования вибровозбудительного оборудования. Для анализа применяются метод декомпозиции в области частот (FDD – frequency domain decomposition), blind source separation (BSS) и complexity pursuit (CP), а также методы, основанные на использовании вэйвлет-анализа.
Идентификация частот и форм собственных колебаний позволяет решить задачу построения адекватной конечно-элементной модели конструкции. Критериями адекватности является близость расчетных и определенных экспериментально частот и форм собственных колебаний.

Определение значений собственных частот и логарифмического декремента затухания с целью оценки текущего технического состояния сооружения, проводится в соответствии с требованиями Федерального закона «О техническом регулировании» ($\Phi 3$ № 184-ФЗ), а также для обеспечения соблюдения требований ГОСТ Р 53778-2010 «Правила обследования и мониторинга технического состояния» (ГОСТ Р 53778-2010). Требования к методике измерений определяются ГОСТ Р 54859-2011 «Определение параметров основного тона собственных колебаний» (ГОСТ Р 54859-2011). Измерение линамических характеристик производится при периодическом обследовании технического состояния и заносится в паспорт сооружения. ГОСТ Р 54859-2011 регламентирует общие принципы проведения измерений и обработки результатов. Отметим ряд из них:

 измерения проводятся по трем взаимно перпендикулярным осям, совпадающим с осями сооружения;

 – значения частот и декремента затухания определяются расчетным методом по спектру измеренного сигнала;

– при измерении регистрируются собственные колебания, вызванные как природнотехногенным фоном, так и с использованием дополнительного динамического воздействия. При этом, учитывая нелинейность характеристик, сравнению подлежат только результаты, полученные в одинаковых условиях;

при сравнении результатов следует принимать во внимание нагрузки на сооружение.

Динамическое тестирование должно выполняться каждые 5 лет (*СТО* 7028424.27.140.032-2009). Область действия ГОСТ Р 54859-2011 не распространяется на гидротехнические сооружения, но представленные в нем методики измерений в целом соответствуют методикам, изложенным в Правилах заполнения типового динамического паспорта ГТС (*Бронштейн, Бугаевский, 2012*).

На напряженно-деформированное состояние и, как следствие, на собственные частоты плотины влияют температура воздуха и напор воды. Поэтому измерения проводят дважды в год, при нормальном подпорном уровне и при максимальной сработке водохранилища. Считается, что таким образом будут получены два крайних значения. Правила выполнения измерений на ГТС дополнительно регулируются Правилами

технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (Правила технической эксплуатации...).

Стандарт организации «Гидроэлектростанции в зонах с высокой сейсмической активностью» (*СТО 7028424.27.140.032-2009*) уделяет очень много внимания организации геодинамического полигона, где собственно методы выполнения мониторинга ГТС прописаны недостаточно. Накопление опыта наблюдений с использованием локальной сейсмологической сети (ЛСС) и автоматизированной системы сейсмометрического контроля (АССК), развитие информационных технологий и методов обработки информации привели к созданию Концепции комплексных наблюдений, на основе интеграции существующих систем в единую систему сейсмических наблюдений (ССН) (*Бугаевский и др., 2015*). Хотя «Концепция» и получила одобрение на секции НТС по ГТС «РусГидро» (14.08.2013), но официальный статус так и не приобрела.

Важным событием стало принятие документа «Техническая политика РусГидро» (Техническая политика..., 2011), где однозначно сформулировано понятие «Оценка эксплуатационного состояния», принципы взаимодействия различных автоматизированных систем диагностики и управления станции, включая на автоматическую систему управления технологическим процессом (АСУ TΠ), виброконтроля ГА, статического мониторинга ГТС.

4.3 Контроль работы гидроагрегатов. Нормативные документы

В данном разделе приведен анализ действующей нормативной и технической документации, касающейся требований к гидроагрегатам (ГА) ГЭС в части: оценки их состояния и оснащения контрольно-измерительной аппаратурой (КИА).

Требования к оценке технического состояния, устанавливаемым системам контроля и измерений нормируемых и/или отслеживаемых параметров основного оборудования ГЭС регламентируются нормативными документами различного уровня, в том числе ГОСТами «Гидрогенераторы. Методики оценки технического состояния» (ГОСТ Р 55260.2.2-2013) и «Гидротурбины. Методики оценки технического состояния» (ГОСТ Р 55260.3.2-2013), Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (Правила технической эксплуатации...) и стандартами организации: (СТО 70238424.27.140.034-2009; СТО 70238424.27.140.005-2010; СТО 70238424.27.140.006-2010; СТО 70238424.27.140.009-2010; СТО 70238424.27.140.015-2010; СТО 70238424.27.140.023-2010; СТО 70238424.27.140.001-2011; СТО «РусГидро» 02.03.70-2011; СТО «РусГидро» 02.01.059-2011).

Преимущественно оценка технического состояния ГА связывается с его вибрациями. В российских документах нормирование касается амплитуды (размаха) фиксируемых виброперемещений: вибраций неподвижных частей ГА и биений вращающихся элементов – валов (роторов). В зависимости от точки контроля нормироваться могут виброперемещения как в радиальном, так и в осевом направлении. Так, в соответствии с п. 3.3.12 (*Правила технической эксплуатации...*) не допускается длительная работа ГА при повышенных уровнях вибрации. Периодичность и объем проверки вибрационного состояния гидроагрегата устанавливаются в соответствии с действующими нормативными документами.

В зависимости от частоты вращения ротора ГА нормируются следующие параметры:

- размах горизонтальной вибрации корпуса турбинного подшипника;

 – размах горизонтальной вибрации верхней и нижней крестовин генератора (если на них расположены направляющие подшипники).

Размах вертикальной вибрации крышки турбины, опорного конуса или грузонесущей крестовины генератора нормируется в зависимости от частоты вибрации. Биение вала гидроагрегата не должно превышать значений, записанных в местной инструкции и установленных заводами-изготовителями гидротурбины и гидрогенератора.

В соответствии с (*СТО 70238424.27.140.001-2011*) также нормируются амплитуды виброперемещений на опорных узлах (направляющие подшипники и подпятник), а также вибрации стальных конструкций статора гидрогенератора. Подробные требования к организации измерения и оценки вибрационного состояния ГА представлены в Приложении И «Методика эксплуатационного контроля вибрационного состояния конструктивных узлов гидроагрегата». В отличие от требований ПТЭ (*Правила технической эксплуатации...*), оценка вибрации опорных узлов ГА производится в зависимости от частоты вибрации в диапазоне от 1 до 30 Гц.

СТО «Гидроэлектростанции. Оценка сейсмостойкости оборудования. Нормы и требования» (СТО 70238424.27.140.034-2009) устанавливает требования к порядку и методике оценки сейсмостойкости эксплуатируемого в составе гидроэлектростанций оборудования для сейсмически опасных районов. Оборудование в случае разрушения или выхода из строя в результате сейсмического воздействия не должно нарушать экологическую безопасность как самого оборудования, так и гидроэлектростанции в целом. Конкретных требований по установке измерительной аппаратуры в СТО не предусмотрено. Стандарт регламентирует порядок проведения испытаний и расчета на сейсмостойкость, в том числе определение динамических характеристик оборудования с целью выявления критических частот, прогнозирования зон возникновения предельных

механических напряжений, оптимизации схем установки контрольных датчиков и т.п. При наличии этой информации можно использовать полученные данные для оценки изменения технического состояния оборудования в части отслеживания динамических характеристик.

Стандарт РусГидро «Мониторинг технического состояния основного оборудования» (*CTO «РусГидро» 02.01.059-2011*) раскрывает более подробно требования к мониторингу технического состояния оборудования, основные положения которых изложены в актуальных версиях СТО (*CTO 70238424.27.140.001-2011*, *CTO 70238424.27.140.005-2010*, *CTO 70238424.27.140.006-2010*, *CTO 70238424.27.140.009-2010*, *CTO 70238424.27.140.015-2010*). Система мониторинга необходима для проведения регулярных наблюдений и контроля параметров технического состояния находящегося в работе основного оборудования. Такая система входит в состав обязательных форм контроля технического состояния оборудования и должна функционировать на каждой ГЭС. Стандарт регламентирует минимальный объем контролируемых параметров.

ΓА Автоматизированная система мониторинга технического состояния предусматривает измерение следующих параметров ГА: электрические и гидравлические параметры, определяющие режим работы; положение регулирующих органов; температура в опорных узлах; уровни масла и воды; давление; расход; вибрации опорных конструкций гидроагрегата; биение (относительное виброперемещение) вала ГА у направляющих подшипников и в подпятнике; вибрации статора гидрогенератора; величина воздушного зазора между ротором и статором гидрогенератора; фаза вращения ротора.

В зарубежной практике вибрационное состояние ГА оценивается на основании требований и предложений двух международных стандартов ISO (*ISO 7919-5:2005; ISO 10816-5:2000*). В настоящее время взамен этих двух стандартов разрабатывается новый документ ISO 20816-5 «Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants». Помимо измерения амплитуд абсолютных и относительных вибраций, документ предусматривает отслеживание тренда изменения амплитуды и фазы, т.к. предполагается, что любое изменение, как в большую, так и в меньшую сторону, связано с изменением состояния системы. В отличие от российских стандартов, предусматривается нормирование виброскоростей, а не виброперемещений для абсолютной вибрации.

Сводный перечень контролируемых параметров определенных в нормативных документах, периодичность контроля и нормы для их оценки приведены в таблице 4.1. Контролируемые параметры позволяют своевременно дать предупредительный сигнал или сигнал на аварийный останов в случае превышения соответствующего уровня.

№ п/п	Наименование параметра	Периодичность контроля	Норма оценки	Примечание	
1	Радиальная вибрация корпуса подшипника	В зависимости от вибрационного состояния: работоспособное – 4-6 лет (до планового капитального ремонта); неработоспособное – 1 раз в год (до ближайшего планового капитального ремонта); предельное – не реже 1-го раза в полгода до выполнения соответствующих ремонтно- профилактических работ.	Нормируется амплитуда вибрации. <i>(СТО</i> 70238424.27.140.001-2011) Приложение И Нормы завода изготовителя	Допустимое значение вибрации зависит от частоты	
2	Биение вала ГА	При наличии автоматической системы – постоянно, при осуществлении контроля персоналом – 1-2 раза в сутки с записью в суточную ведомость, а при возникновении повышенного биения вала частоту контроля по решению технического руководителя эксплуатирующей организации увеличивают.	Нормируется амплитуда вибрации. Устанавливается заводом- изготовителем (СТО 70238424.27.140.001-2011) Приложение И		
3	Вибрация сердечника статора (горизонтальная)	В зависимости от вибрационного состояния: работоспособное – 4-6 лет (до планового капитального ремонта); неработоспособное – 1 раз в год (до ближайшего планового капитального ремонта); предельное – не реже 1-го раза в полгода до выполнения соответствующих ремонтно- профилактических работ.	Нормируется амплитуда вибрации частоты 100 Гц и по низкочастотным составляющим вибрации («полюсной», «оборотной» и кратных ей) (СТО 70238424.27.140.001-2011) Приложение И	Во всем диапазоне нагрузок	
4	Воздушный зазор между ротором и статором гидрогенератора	При каждом капремонте, но не реже, чем 1 раз в 5 лет	Нормируется средняя величина зазора и его форма (ГОСТ Р 55260.2.2-2013) Приложение Б, Л	Нормы оценки на величину зазора в работающем и остановленном состоянии – одинаковые.	
5	Зазор «камера-лопасть» поворотно-лопастной турбины или в лабиринтных уплотнениях рабочего колеса радиально-осевой турбины	Во время проведения плановых ремонтов.	Соответствие конструкторской (и/или монтажной) документации; допускается отклонение не более чем на 20 % (СТО 70238424.27.140.001-2011) Приложение И	Целесообразно включать измерения зазора в состав мониторинга	

Таблица 4.1 – Контролируемые параметры гидроагрегатов

№ п/п	Наименование параметра	Периодичность контроля	Норма оценки	Примечание	
6	Биение зеркальной поверхности диска	При каждом капитальном и аварийном ремонте	Нормируется величина биения. (СТО 70238424.27.140.006-2010) Приложение Д	В зависимости от типа подпятника	
7	Вибрация опоры подпятника (вертикальная)	Периодичность контроля, в зависимости от вибрационного состояния: работоспособное – 4-6 лет (до планового капитального ремонта); неработоспособное – 1 раз в год (до ближайшего планового капитального ремонта); предельное – не реже 1-го раза в полгода до выполнения соответствующих ремонтно- профилактических работ.	Нормируется величина вибрации. <i>(СТО 70238424.27.140.006-2010)</i> п.Д2.1 Приложение Д	В зависимости от частоты вибрации	
8	Горизонтальная вибрация верхней и нижней крестовин генератора	Периодические вибрационные испытания согласно (СТО 70238424.27.140.001-2011)	(CTO 70238424.27.140.006-2010)		
9	Вертикальная вибрация крышки турбины	Периодические вибрационные испытания согласно (СТО 70238424.27.140.001-2011)	(CTO 70238424.27.140.006-2010)		

4.4 Методы мониторинга гидротехнических сооружений

В настоящее время для оценки состояния плотин используются в основном два метода:

 – анализ отклика на сильные импульсные или вибрационные воздействия (землетрясения, взрывы или специальные геофизические или инженерносейсмометрические вибраторы);

 определение пространственного распределения в теле плотины собственных колебаний, вызванных постоянно присутствующей шумовой компонентой поля колебаний (как микросейсм, так и ветровых или гидрологических пульсаций).

Работы, представляющие наиболее полно указанные методы, а также методы контроля работы агрегатов с указанием их чувствительности к опасным процессам, сведены в таблице 4.2. Ниже остановимся на вопросах, которые исследованы недостаточно полно.

4.4.1 Возможности использования слабых землетрясений

Определение и контроль динамических характеристик ГТС с использованием внешних источников возбуждения колебаний рекомендован при заполнении Типового динамического паспорта ГТС (*Байчиков и др., 1994; Василевский, Козлов, 2012*). Используемые методы рассчитаны на измерение реакции сооружения на внешнее, достаточно интенсивное, динамическое воздействие. В литературе эти методы известны как «экспериментальные» или «традиционные».

Взрыв, как источник сейсмического воздействия, для больших и протяженных сооружений применяется крайне редко. Это связано, прежде всего, с тем, что для раскачки большого сооружения требуется значительная мощность взрыва, а это, в свою очередь, может повлиять на другие сооружения или быть неприемлемо по экологическим и социальным причинам. Классический эксперимент был проведен в СССР на Андижанской ГЭС (Шаблинский, 2013). Взрыв сравнительно небольшой мощности (20 кг взрывчатого вещества) был осуществлен в водохранилище на расстоянии 50-100 м от напорного фронта плотины. Генерировалось импульсное воздействие ударной волной, практически «ступенька», по всему фронту сооружения. Причем, проводя взрывы в разных точках, можно было изучать реакцию на приход практически плоской волны. Экологические последствия были незначительными. Как указали авторы отчета, с поверхности воды после взрыва собрали несколько килограммов мелкой рыбы.

Таблица 4.2 – Перечень экспериментальных методов мониторинга плотин и контроля работы агрегатов с указанием их чувствительности к опасным процессам

Метод	Объект	Опасный процесс	Ограничения и основные недостатки	Источник	
1	2	3	4	5	
Расчет спектра реакции при воздействии взрывов или землетрясений	плотина	Изменение состояния плотины, сейсмические колебания грунта	Неприменим в требуемый момент времени; не применим в районах, где нет промышленных взрывов и региональных землетрясений; погрешности при задании сейсмического воздействия по записям, полученным на удалении от плотины	Fenves et al., 1992; Loh, Tsu- Shiu, 1996; Kramer, 1996; РБ 006-98; Шаблинский, 2013; Завалишин, Шаблинский, 2015; Ditommaso et al., 2013; Vidal et al., 2013; Низомов и др., 2015	
Вибрационное тестирование источником, размещённым за пределами инженерного сооружения	плотина	Изменение состояния плотины	Высокая стоимость мощного вибрационного источника и проведения обследования, сложность доставки источника в горные районы,.	Айзенберг, 1963; Ibrahim, Mikulcik, 1977; Шаблинский, Зубков. 2009; Cantieni, 2009; Активная сейсмология, 2004; Шаблинский, 2013; Завалишин, Шаблинский, 2015	
Обследование сооружений с Изменение Изменение использованием вибраций от плотина Состояния плотины		Не гарантирует идентичности условий для каждого конструктивного элемента исследуемой системы из-за того, что вибрации от транспорта являются случайным процессом.	Алимов, 2006; ГОСТ Р 52892-2007; ГОСТ Р 53964- 2010		
Использование слабых землетрясений для мониторинга объекта	плотина	Изменение состояния плотины	Требуется ряд вычислительных итераций при подборе расчетной модели максимально удовлетворяющей реальному состоянию объекта.	Antonovskaya et al., 2016	
Контроль технического состояния гидроагрегатов	ического роагрегатов		Периодичность в обследовании (от 2 мес. до 6 лет). За это время реальное состояние гидроагрегата может измениться.	РД 34.31.303-96, РД 34.31.305-96	
Непрерывный контроль технического состояния гидроагрегатов, техническая диагностика		— // — Возникновение кавитационных пульсаций	Требует дополнительной проработки вопроса, в т.ч. совместного анализа данных, записанных различными датчиками	Жданова, 1984; Белоглазов, 2009; Трунин, Скворцов, 2010; Xu Zhenyu et al. 2015; Antonovskaya et al., 2017	

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5		
Анализ изменения динамических характеристик сейсмического поля при сейсмич. просвечивании	район размещения объекта	Выявление аномальных зон в геологической среде	Сложный алгоритм наблюдений и обработки, связанный с проведением регулярных режимных просвечиваний удаленными взрывами.	Юдахин и др., 2007, Сейсмологические исследования, 2011		
	плотина	Изменение состояния плотины	Погрешности определения передаточной функции, вызванное неточной временной синхронизацией, суперпозицией сигнала и случайного волнового поля в опорной точке. При реализации выявлено несоответствие задаваемой компьютерной модели сооружения его реальному состоянию, что приводит к получению осредненных результатов.	Патент 2461847 RU; Еманов и др., 2010; Лисейкин и др., 2014		
	район размещения объекта	Выявление аномальных зон в геологической среде	Сложный алгоритм наблюдений и обработки, связанный с выделением монохроматических сигналов от работающих агрегатов. Бунгум и др., 1981; Юде и др., 2007, Сейсмологические исследования, 2011			
Анализ изменения динамических характеристик микросейсмического поля	плотина	Изменение состояния плотины	Сложность выделения первой моды колебаний. Возможность неточного определения передаточной функции, вызванное неточной временной синхронизацией, суперпозицией сигнала и случайного волнового поля в опорной точке. Несоответствие задаваемой компьютерной модели сооружения его реальному состоянию, что приводит к получению осредненных результатов.	Snieder, Şafak, 2006; Gallipoli et al., 2009; Castellaro et al., 2013; Calcina et al., 2014		
	плотина	Изменение состояния плотины	—— // —— Усреднение параметров по всей конструкции сооружения не позволяет локализовать место возможного дефекта.	Патент RU 2515130; Кузменко и др., 2007; Золотухин и др., 2013		
	плотина	Изменение состояния плотины	Использование в качестве эталона расчетные интегральные характеристики компьютерной модели теоретической (проектной) конструкции сооружения дает лишь общее представление о состоянии объекта.	Патент РФ № 2413193		

Измерения с использованием вибромашины (вибровозбудителя) не лишены своих недостатков. Сама машина весит несколько тонн, должна быть жестко закреплена на гребне плотины. Измерения проводятся при установке машины в нескольких точках. Процесс весьма трудоемкий и затратный. Измерения с использованием этого метода, как правило, проводят только при вводе вновь построенного сооружения в эксплуатацию.

Использование землетрясений для определения собственных частот характеризуется многими трудностями. Это связано не только с непредсказуемостью времени землетрясений, но и со значительным влиянием на результаты измерений направления распространения сейсмической волны, ее затухания и спектрального состава колебаний.

При оценке реакции плотины на ощутимые землетрясения в качестве входного сигнала обычно используют запись с одного из ближайших пунктов сейсмологической сети, расположенного в лучшем случае на удалении от плотины от 1 км и более, и зачастую в иных грунтовых условиях, чем непосредственное основание плотины. Таким образом, используется заведомо иной «входной» сигнал, что является причиной получения искаженной оценки спектра реакции. Известно, что на спектральный состав и амплитуды регистрируемого сейсмического сигнала влияет геологическое строение верхней части земной коры в районе размещения пункта сейсмических наблюдений, в том числе уровень грунтовых вод и резонансные свойства приповерхностных слоев.

Одним из главных факторов является иной состав грунтов. Приращение сейсмической интенсивности за счет различия грунтовых условий ΔI_c определяется по формуле (*PCH 60-86*):

$$\Delta I_{\rm c} = 1.67 \lg(\frac{(\rho V_s)_0}{(\rho V_s)_i}) \tag{4.1}$$

 $\rho_i V_s$ –сейсмическая жесткость грунта расчетной толщи, т/м² × с, ρ – плотность грунта, т/м3; V_s – скорость поперечных сейсмических волн в расчетной толще, м/с. Индексами *i* и 0 обозначены соответственно изучаемый и эталонный грунт.

Из формулы (4.1) следует условие, что, например, увеличение сейсмической жесткости в 4 раза соответствует увеличению интенсивности в 1 балл (Заалишвили, 2000; Алешин, 2010), что легко реализуется для широкого класса грунтов (II и III категории). Такие грунты типичны при выборе мест вблизи берегов водохранилища, в то время, как основанием плотины являются скальные грунты I категории.

Положение уровня грунтовых вод также вносит весомый вклад в расчет итоговой сейсмической балльности, согласно (*PCH 60-86*):

$$\Delta I = \Delta I_c + \Delta I_e + \Delta I_{pe3} \tag{4.2}$$

где ΔI – суммарное приращение сейсмической интенсивности (в баллах) относительно исходной (фоновой) балльности, принимаемой для района исследований в соответствии с PCH60-86; ΔI_c – приращение сейсмической интенсивности за счет различия сейсмической жесткости грунтов на изучаемом и эталонном участке; ΔI_B – приращение сейсмической интенсивности за счет ухудшения сейсмических свойств грунтов на изучаемом участке при обводнении (водонасыщении); ΔI_{pe3} – приращение сейсмической интенсивности за счет возможного возникновения резонансных явлений при резком различии сейсмических жесткостей в покрывающей и подстилающей толще пород изучаемого разреза.

Из (4.1) и (4.2) следует, что пункт сейсмологической сети, используемый для получения записей землетрясений при расчете спектра реакции плотины, должен находится не только на грунтах таких же, как и основание плотины (как правило I категории), но и быть удален от водохранилища для исключения изменения водонасыщенности при подьеме УВБ.

Таким образом, при расчетах спектра реакции ошибка в амплитудах воздействия величиной до 100 % (вдвое) неизбежна, кроме случаев, когда проводятся специальные работы по подбору мест для ЛСС, ориентированных на регистрацию сведений о сейсмических воздействиях. Последнее требование не отображено в нормативах (ПТЭ), поэтому, как правило, и не выполняется. Таким образом, по существу, воздействие землетрясения будет иным, чем принимается к расчету.

Задаваясь величиной ошибки, удовлетворительной для расчетов спектра реакции, можно оценить пригодность точки регистрации ЛСС, исходя из зависимости (4.2) – расчета приращения балльности по экспериментальным записям колебаний по (Medbedeb, 1962; PCM-73; Рекомендации.... 1985):

$$\Delta I_i (f_{\Delta}) = 3.3 \, lg \, A_i(f_{\Delta}) / A_0(f_{\Delta}) \tag{4.3}$$

где f_{Δ} – полоса частот колебаний. в которой производятся расчеты; $A_i(f_{\Delta})$. $A_0(f_{\Delta})$ – среднеквадратичные спектральные амплитуды колебаний исследуемых и эталонных грунтов. $\Delta I_i(f_{\Delta})$ – приращение балльности в *i*-той точке исследуемых грунтов. Данная функция является частотно-зависимой, что связано с частотно-избирательными (в том числе резонансными) свойствами грунтов. Выражение (4.3) справедливо в линейно-упругом диапазоне (колебаний от слабых землетрясений).

Для корректировки расчетов, вообще говоря, надо производить сейсмическое микрорайонирование для существующей ЛСС или при ее создании, причем на значительной территории, учитывая разные направления подхода волн от землетрясений для опорной сейсмостанции и плотины.

Еще одним недостатком использования сильных землетрясений (кроме значительных погрешностей амплитудно-частотных параметров) является тот факт, что используются землетрясения магнитуды более 3.5, что обусловлено необходимостью уменьшения погрешностей расчета за счет увеличения соотношения сигнал-помеха для землетрясения и микросейсм. В сейсмоактивном районе события с такой магнитудой происходят не так часто и не всегда, когда требуется оценить состояние плотины. По нашему опыту для ЧГЭС за период 2012-2016 гг. произошло менее 10 землетрясений с магнитудой 3.5 и более. Они были зарегистрированы на с/с «Дубки» в 7 км от ЧГЭС, их условно можно принять для расчетов, но по соотношению сигнал-помеха погрешность получаемой оценки составляет примерно 50%. В этот период не было более сильных землетрясений, подходящих для расчетов спектра реакции по стандартной методике.

Другой возможностью модификации метода, использующего внешние воздействия на плотину для оценки ее состояния, является развиваемый нами метод тестовых воздействий (Антоновская и др. 2016). Суть методики следующая. С использованием сейсмодатчиков, размещенных в ключевых точках объекта, проводится регистрация тестового воздействия, составляется (или используется имеющаяся) численная модель сооружения, для которой задается наблюденное воздействие и рассчитываются параметры, характеризующие реакцию сооружения, которые сопоставляются с наблюденными. При расхождении значений проводится итерационное изменение модели до согласования параметров. Об изменениях в объекте судят по изменениям в модели. В отличие от существующих подходов в качестве «входного» сигнала может быть использована запись слабого землетрясения или пуска ГА с датчиков, установленных в бортовых примыканиях. При несовпадении перемещений в *i*-ом пункте установки датчика на плотине меняют параметры модели в окрестности этого пункта, при разнице в собственных частотах колебаний – параметры модели в целом, в основном изменяются условия закрепления к берегам. В результате получаем расчетную модель, соответствующую реальному состоянию плотины. Учитывая, что пуски агрегатов происходят несколько раз в день, а спектральный состав близок к таковому для землетрясений, получаем возможность практически непрерывного мониторинга.

При выполнении ряда требований к регистрирующей аппаратуре (см. гл. 2) методика характеризуется следующими достоинствами:

 устраняется погрешность несоответствия грунтовых условий при задании «входного» сигнала в расчетную модель за счет того, что сигнал зарегистрирован в аналогичных грунтовых условиях, что и породы, слагающие основание плотины;

 устраняется погрешность за счет изменения волновых форм в точке регистрации и в точках приложения воздействия, не требуется учета так называемого затухания сигнала;

 – реализуется возможность мониторинга практически в любое время, используя, например, пуски ГА.

При подборе тестирующего сигнала важно:

1) частотный диапазон «входного» сигнала должен включать частоты первых форм собственных колебаний сооружения;

2) достаточно хорошее (не менее 5) отношение сигнал-помеха в полосе частот основных мод собственных колебаний, получаемое, например, после фильтрации высоких частот.

Существенно, что в результате применения метода тестовых воздействий получаем не спектр реакции, которой сам по себе не является характеристикой изменения состояния плотины, а измененную математическую модель плотины, в которой отмечены участки, где произошли изменения и указаны какой именно параметр (жесткость, условия закрепления и пр.) пришлось поменять, чтобы добиться совпадения модели с реальными данными.

Для наглядного объяснения метода рассмотрим его применение на системе мониторинга ЧГЭС, удовлетворяющей требованиям метода по регистрации. В качестве «входного» сигнала используется запись относительно слабого землетрясения, полученная одним из каналов системы непосредственно около плотины (на массиве бортового примыкания) (Антоновская и др., 2016).

На рисунке 4.1 приведена расчетная модель с указанием точки (желтая звездочка), откуда была взята запись местного землетрясения 31 марта 2013 г., ощущавшегося на плотине как 2-3 балльное. Сравнение расчетных и экспериментальных записей, полученных на плотине, показывает их хорошее согласие, что иллюстрируют волновые формы и амплитудные спектры в одной из точек (отмечено треугольником на рисунке 4.1).

Существенно, что пробное воздействие позволило получить пространственное распределение напряжений. Обратим внимание на картину растягивающих напряжений, наиболее «неприятную» для бетонных конструкций. Прежде всего – на асимметрию картины на бортовых примыканиях, особенно на обширную зону примыкания к правому берегу. Именно здесь наблюдается развитие трещиноватости, что подтверждает правильность полученной картины напряжений. Обратим внимание на добавочные напряжения в верхах водоводов, эта зона также является концентратором нагрузок, что визуально проявляется в «шелушении» внешней бетонной оболочки стальных водоводов.

Отмеченные особенности позволяют считать предлагаемую методику мониторинга плотины перспективной.



Рисунок 4.1 – Мониторинг состояния плотины Чиркейской ГЭС с помощью пробных воздействий: расчетная модель (а) и результаты воздействия: записи и амплитудные спектры расчетных и реальных колебаний на плотине (б), в – расчетные поля напряжений после землетрясения

Практическое использование предлагаемой методики связано с аппаратурной модернизацией системы инженерно-сейсмометрического мониторинга, в первую очередь с применением более чувствительных сейсмодатчиков и регистраторов с большим динамическим диапазоном, также цифровой (по оптоволокну) передаче данных, как, например, было реализовано на Чиркейской ГЭС. При этих условиях появляется возможность использовать специфические сигналы – записи пусков ГА, (несколько раз в сутки), т.е. оценивать состояние плотины практически в любое время.

При чувствительной аппаратуре можно также усложнить расчетную модель, включая работу затворов и водовода, т.к. при поступлении воды в водовод на записях на плотине появляется характерный низкочастотный сигнал, предваряющий более высокочастотный пуск («аномальные» пуски отмечены стрелкой на рисунке 4.2).



Рисунок 4.2 – Сейсмограммы пуска агрегата Чиркейской ГЭС: записи в машинном зале и на плотине на отм. 315 (амплитуда записи в машзале уменьшена), стрелка – возникновение низкочастотных колебаний

4.4.2 Наблюдения собственных колебаний плотины и верификация матмодели

Для многих ответственных объектов, в том числе ГЭС, помимо обследований после аварий и сильных землетрясений (по (*РД 34.20.501-95*) после 5-балльного события), проводится мониторинг состояния конструкций в непрерывном режиме, включающий не только геодезические наблюдения, но и измерения, отображающие напряженнодеформированное состояние (НДС) объекта (тензометрия, инженерная сейсмометрия и пр.). Такие измерения при соответствующей чувствительности датчиков обеспечивают возможность, во-первых, оценить ситуацию до визуального проявления дефектов и, вовторых, дают экспериментальную основу для оценки безопасности путем создания расчетных моделей объектов (*Антоновская и др. 2015*).

При собственных частот использованием измерениях сооружения с микросейсмических колебаний существуют две основные проблемы. Прежде всего, это малая амплитуда воздействия и, соответственно, отклика, что определяет точность оценки. Вторая проблема, _ неравномерность спектра воздействия. В спектре могут присутствовать мощные узкополосные сигналы, близкие по частоте с измеряемыми величинами, т.е. требуется разделение колебаний по частоте.

В настоящее время в сейсмометрии произошла техническая революция: цифровая регистрация позволяет проводить широкополосные наблюдения с динамическим диапазоном от 130 дБ и более (см. гл. 2), а также реализовывать разнообразные способы обработки получаемых данных. Новые возможности послужили толчком к созданию

разнообразных сейсмических методик (таблица 4.2). Указанные подходы активно развиваются, имеют своих сторонников и могут быть использованы как независимые методы по обследованию состояния сооружения. В основе лежат идеи определения собственных частот (стоячих волн) колебаний сооружения, анализ амплитуд форм колебаний позволяет говорить о целостности конструкции. В дополнении используется сравнение экспериментальных результатов с расчетной моделью работы конструкций или по полученным данным создание расчетной модели.

Опыт применения различных методик показал, что у каждой существуют ограничения, поэтому одной из задач диссертационной работы является создание новой методики на основе анализа существующих и их доработок. Обсудим принципиальные вопросы, требующие дополнительной проработки. Предложения иллюстрируются нашими экспериментальными сейсмическими данными, полученными при обследовании различных объектов.

Важной задачей при обследовании сооружения, как уже упоминалось выше, является составление его расчетной модели, отражающей изменения, которые произошли в конструкциях. Вопрос о свойствах математических моделей рассмотрен достаточно подробно в отчете «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» (*Научно-технический отчет..., 2017*). В настоящее время наблюдается тенденция усложнения расчетных моделей, как правило, в модель добавляется детальное описание рельефа и/или геологического строения района размещения плотины. На рисунке 4.3 представлена такая модель, выполненная для Чиркейской ГЭС сотрудниками «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева».



Рисунок 4.3 – Конечно-элементная динамическая модель системы «плотина-основание», выполненная для Чиркейской ГЭС «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» (Научно-технический отчет..., 2017)

На рисунке 4.4 представлены первые три формы собственных колебаний для данной модели. Обратим внимание на пространственное распределение НДС при собственных колебаниях этой модели. Видна асимметрия полей напряжений, что связано с формой

рельефа и асимметрией самой плотины. Таким образом, модель «чувствует» особенности строения. Тем не менее, в формах пространственного распределения напряжений при собственных колебаниях не отражено наличие сталежелезобетонных водоводов. Этот факт указывает на то, что принятое усложнение модели за счет рельефа – не панацея, оно не дает возможности выявить изменение состояния водоводов даже при основном методе инженерно-сейсмометрического мониторинга плотины – методе собственных колебаний.



Первая форма колебаний плотины на частоте 1.966 Гц



Вторая форма колебаний плотины на частоте 2.035 Гц.



Третья форма колебаний плотины на частоте 3.26 Гц

Рисунок 4.4 – НДС плотины при трех формах собственных колебаний для расчетной модели рисунка 4.3

Введение в модель строения района размещения выполняется для того, чтобы рассчитать реакцию плотины на землетрясение, причем записанное не вблизи плотины. По существу, все усложнение модели сводится к попытке учесть затухание сигнала при подходе к объекту. Учитывая неточности знания деформационных свойств и строения сложнопостроенной геологической среды, такое усложнение модели для использования традиционных методик мониторинга (воздействие землетрясений) представляется малоэффективным.

Теперь обратим внимание на некоторые примеры, показывающие, какие параметры изменения модели могут быть уверенно получены экспериментально. Следует заметить, что до начала работ мы не имели сведений о собственных частотах колебаний плотин, поэтому обследования велись «вслепую». Это имело определенную ценность, т.к. часто в физическом эксперименте знания *a priori* «обрезают» круг рассматриваемых представлений о процессах.

Работы проводились в Республике Дагестан на Сулакском каскаде ГЭС по договору с ПАО «РусГидро» при создании динамических паспортов ГЭС. Дагестан является территорией, для которой характерно проявление опасных процессов (землетрясения, паводки, сели, камнепады и пр.). Гунибская ГЭС (рисунок 4.5) на р. Кара-Койсу возведена

в сложных горных топографических и геологических условиях. Наличие узкого каньона, обнажения коренных пород в крутых бортах ущелья, большое содержание наносов в реке явились основной предпосылкой для строительства гидроузла с арочной бетонной плотиной (длина по гребню 58.74 м; высота – 73.70 м, ширина по гребню 4.5 м), рядом расположен автомобильный мост.



Рисунок 4.5 – Общий вид плотины Гунибской ГЭС, Дагестан, Россия

В июле 2009 г. в результате сильных ливневых дождей в бассейне р. Кара-Койсу произошло увеличение притока к створу Гунибской ГЭС с подъемом уровня водохранилища. Тело плотины Гунибской ГЭС выдержало напор воды и стабилизировало стихийный паводок, что предотвратило затопление населенных пунктов, лежащих ниже по течению реки. Однако в результате паводка был произведен ряд повреждений в плотине и в связанных с ней опорах моста.

Для получения реальных параметров собственных колебаний плотины (одной из основных характеристик динамики сооружения), проводились сейсмометрические наблюдения по следующей схеме. Датчики (велосиметры CM-3KB (Россия) и акселерометры CMG-5T (Guralp, Великобритания)) размещались по профилям на гребне и галерее плотины – по 11 измерительных точек на каждый профиль (рисунки 4.6, 4.7). На данных рисунках отчетливо видны температурные швы, разделяющие тело плотины на секции.



Рисунок 4.6 – Схема размещения измерительной аппаратуры на гребне плотины: красные треугольники – велосиметры CM-3KB; синие треугольники – акселерометры CMG-5TD



Рисунок 4.7 – Схема размещения измерительной аппаратуры в галерее плотины: красные треугольники – велосиметры СМ-3КВ; синие треугольники – акселерометры СМG-5TD

Рассчитывались спектры мощности сейсмометрических записей (рисунок 4.8). Кроме того, учитывая, что собственные колебания в отличие от наведенных будут представлены стоячими волнами, рассчитывалась функция когерентности между пространственными точками (*Сейсмологические исследования..., 2011*).



Рисунок 4.8 – Спектры мощности горизонтальных радиальных (по течению реки) компонент колебаний, записанных велосиметрами в точках на теле плотины – на гребне и в галерее (разные цвета кривых соответствуют разным точкам регистрации)

Совместный анализ спектров и когерентности показывает следующее:

- в области низких частот (рисунок 4.8) на всех спектрах устойчиво присутствует максимум, доминирующий по мощности, центральная частота 0.47 Гц,

- на более высоких частотах всем признакам собственных колебаний соответствуют пики на частотах: 3.6; 4.3; 6.7; 9.9; 11.5 Гц,

- пики на других частотах «дрейфуют» по частоте от одной точки наблюдений к другой, т.е. не являются собственными колебаниями плотины,

- пики на частотах, соответствующих оборотной и двойной оборотной частотам вибрации агрегатов (6.25 и 12.5 Гц) отсутствуют, т.к. в часы измерений из-за низкого уровня воды ГА временно не работали.

На основании определения абсолютных уровней амплитуд и фаз колебаний в разных точках, были построены кривые изменения амплитуд по профилям вдоль плотины, что соответствует реальным формам собственных колебаний. Данный метод подробно описан в (*Kanycmян и др., 2011*). Результаты для основной формы колебаний – радиальных перемещений в горизонтальной плоскости (направление по течению реки) представлены на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Экспериментальные определения горизонтальных радиальных перемещений (в мкм) точек арочной плотины Гунибской ГЭС на отметках гребня и галереи на собственной частоте 0,47 Гц

При анализе собственных колебаний плотины обратим внимание на следующие особенности:

1) кривые форм не симметричны относительно оси, проходящей через центр плотины;

2) собственные частоты распределены по частотной оси неравномерно – существуют близкие значения для разных форм;

3) кривые подобны по форме в том, что наблюдаются резкие изменения амплитуд при переходе через деформационные швы в центральной части плотины – кривые «чувствуют» температурные швы – до и после них резко меняется характер движения точек;

4) на краях плотины наблюдаются ненулевые перемещения, что невозможно при жестком закреплении в берегах. Например, это проявляется в галерее при удалении от центральной оси на 30 м вправо, хотя данная точка наблюдений уже находится вне тела плотины. Все это указывает на существование со стороны берега некой присоединенной массы к плотине, которая также участвует в колебаниях;

5) сравнение форм перемещений верхнего гребня и галереи показывает, как подобие их форм на малых отрезках, так и значительное различие (рисунок 4.9), вплоть до противофазы в точках. Последнее возможно при изгибной деформации в вертикальной плоскости (параллельной фасаду плотины).

Для интерпретации полученных особенностей рассмотрим результаты модельных расчетов, выполненных нами по чертежам плотины ГЭС. Модель плотины Гунибской ГЭС задавалась 3D элементами с размером ребра приблизительно равным 1 м в программном комплексе «Лира». Для понимания основных закономерностей не были учтены некоторые детали (галерея, водосброс, технические устройства), зато заданы температурные (деформационные) швы, как элемент существенный для динамики

плотины. Учитывая, что обследования происходили в зимнее время, следует ожидать максимального «раскрытия» температурных швов и наиболее яркого проявления обособленности динамики различных звеньев плотины, особенно в ее верхней части. В модели в деформационных швах части плотины соединены стержнями контролируемой жесткости, длиной приблизительно 0.15 м. При моделировании задавались различные параметры плотины.

Модель № 1 – «жесткое закрепление». Заданы закрепления на подошве пробки и собственно плотины от линейных перемещений по осям Х, Ү, Z; на боковой грани пробки и плотины – по осям Х, Ү. Соединительные элементы в деформационных швах имеют поперечное сечение 10х10 см, материал – такой же, как в теле плотины.

Модель № 2 – Модель аналогична модели №1. Соединительные элементы в деформационных швах имеют поперечное сечение 30×30 см, материал – такой же, как в теле плотины.

Модель № 3 – «нежесткое закрепление». Заданы закрепления на подошве пробки от линейных перемещений по осям X, Y и от поворотов вокруг всех осей; на подошве плотины – только от линейных перемещений по осям X, Y. Кроме того по подошвам пробки и плотины задано упругое основание с коэффициентом постели $C_1 = 10000 \text{ т/m}^3$. На боковой грани пробки заданы закрепления по осям X, Y, боковая грань плотины – свободна. Соединительные элементы в деформационных швах имеют поперечное сечение 15×15 см, материал – такой же, как в теле плотины.

Модель № 4 – Модель аналогична модели № 3. Упругое основание по подошвам пробки и плотины имеет коэффициент постели C₁ = 5000 т/м³.

Модель № 5 – «учет пригруза воды». Модель аналогична модели № 4. Часть тела плотины и пробки толщиной 3 м со стороны водохранилища задана с увеличенной массой (4 т/м³ вместо 2,4 т/м³).

Модель № 6. Модель аналогична модели № 5. Часть тела плотины и пробки толщиной 3 м со стороны водохранилища задана с увеличенной массой (4 т/м³ вместо 2,4 т/м³ – для плотины, 6 т/м³ вместо 2,4 т/м³ – для пробки).

Модель №.7 – «учет присоединенной массы при нежестком закреплении». Модель аналогична модели №.6. Крайние блоки плотины заданы с увеличенной массой (8 т/м³)

Модель № 8 – «учет присоединенной массы при жестком закреплении». Модель аналогична модели № 7, на боковой грани пробки и плотины закреплены по осям X, Y.

Для каждой из моделей рассчитывались формы собственных колебаний, затем, анализировались для различных форм собственные частоты и смещения в точках, совпадающих с положением мест наблюдения (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Расчетные значения частот для форм колебаний 1-15 для разных моделей

f, Гц

Φopγ(a	Номер модели							
Форма	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.587	1.616	0.866	0.625	0.555	0.555	0.343	1.401
2	2.147	2.165	0.953	0.69	0.612	0.612	0.378	1.684
3	5.649	6.655	1.399	1.394	1.245	1.242	1.059	1.794
4	6.403	7.039	1.656	1.639	1.457	1.456	1.177	1.913
5	8.641	8.773	1.891	1.889	1.68	1.679	1.610	2.555
6	9.365	9.393	2.283	2.281	2.026	2.024	1.889	5.219
7	9.449	9.46	3.949	2.904	2.667	2.566	1.981	5.360
8	9.808	9.848	4.774	3.434	3.105	3.105	2.015	5.609
9	10.331	11.156	5.077	3.654	3.313	3.313	2.573	6.467
10	12.844	13.153	5.787	5.759	5.268	5.121	4.937	7.660
11	13.557	13.834	6.526	6.304	5.772	5.608	5.414	7.816
12	14.978	15.925	8.487	8.483	7.677	7.618	5.486	7.919
13	16.291	17.603	8.786	8.755	7.974	7.845	5.629	9.372
14	17.539	18.233	9.45	9.443	8.509	8.466	6.494	10.650
15	18.119	18.326	9.984	9.864	8.869	8.868	7.464	11.677

- главным фактором, влияющим на значения частот является закрепление модели как

Анализ таблицы 4.3. показывает следующее:

в берегах, так и податливость основания. При раскреплении в берегах частота может снизиться вдвое для первой формы и до 5 раз на более высоких частотах. Сетка частот становится неравномерной, появляются формы на близких частотах. При уменьшении вдвое коэффициента постели частоты уменьшаются на 25%, но не все, а избранные – формы 1-2 и 7-9.

- учет пригруза воды также снижает частоту (до 20%), но уточнение эпюры нагрузки практически не влияет на частоту (модели 5 и 6),

- учет присоединенной массы проявляется двумя факторами: во-первых также снижает частоту (для первой формы при нежестком закреплении концов – вдвое, при закрепленных – на 15%). Во-вторых, и это основное – наименьшим образом меняются частоты первых форм, для более высоких – до 100 %.

Анализ результатов расчетов показывает следующее. Главным фактором, влияющим на изменение собственной частоты плотины, является закрепление в берегах; от вариаций уровня воды зависит не много. Все это доказывает эффективность метода собственных колебаний для мониторинга безопасного состояния плотин.

Анализ полученных расчетных форм колебаний показывает следующее:

- кривые профиля форм, как правило, не симметричны относительно оси, проходящей через центр плотины, что согласуется с особенностью 1 экспериментальных данных. Причиной данного факта является несимметричность модели, учитывая абрис берегов. Кроме того, наличие температурных швов существенно влияет на расчетные формы колебаний плотины и перемещения блоков – при переходе через них, направления перемещений могут меняться на противоположные (рисунок 4.10). Это отражено в асимметрии кривых для форм колебаний и согласуется с картиной реальных колебаний плотины. Таким образом, отсутствие симметрии является важным доказательством реальности полученной картины;

- набор расчетных собственных частот представлен группами с близкими значениями (рисунок 4.10), что согласуется с особенностью 2,

- при нежестком закреплении на боковых гранях плотины наблюдается особенность 3 – ненулевые перемещения. Отметим, что достаточно большие величины перемещений вблизи краев возможны даже при их закреплении, что соответствует повороту секций (форма 9, рисунок 4.10),

- перемещения верхнего гребня и галереи могут быть противоположными (рисунок 4.10, форма 6), что объясняет **особенность 4** экспериментальных данных. Данный факт объясняется присутствием изгибной деформации в вертикальной плоскости (параллельной фасаду плотины).



Рисунок 4.10 – Отдельные кривые расчетных форм собственных колебаний, построенные в точках натурных наблюдений на гребне плотины Гунибской ГЭС (слева) и объемная картина собственных колебаний форм № 6 и № 9 (справа)

Таким образом, в теоретической модели были получены объяснения всех особенностей форм перемещений, полученных экспериментально, что обосновывает достоверность полученных результатов.

Главным выводом из приведенного примера является то, что стоячие волны могут «вовлекать» в перемещения не только плотину, но и блоки бортовых примыканий. Эту возможность надо учитывать в расчетной модели.

В связи с полученными результатами представляет определенный интерес обсуждение существующих представлений о формах собственных колебаний плотин и возможностях их наблюдений сейсмометрическим способом. «Образцовым» в настоящее время считаются работы, выполненные для Саяно-Шушенской ГЭС – расчет и натурные обследования (Динамический паспорт..., 2005, Патент 2140625; Селезнев и др., 1998).

На рисунке 4.11 приведены результаты расчетов, выполненные ВНИИГ по программе СИПРАМАК (*Динамический паспорт.., 2005*). Плотина СШГЭС существенно больше по размерам (высота 245 м, длина 1066 м), чем плотина Гунибской ГЭС.



Рисунок 4.11 – Результаты расчета ВНИИГ собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при УВБ 540 м (слева) и натурных определений собственных колебаний, частоты приведены при УВБ 539м /501 м (Динамический паспорт..., 2005)

В соответствии с описанием расчетов, в модели были заданы деформационные швы. Тем не менее, их присутствие не проявляется в результатах расчетов. Полученная теоретическая картина крайне примитивна и соответствует решению для пластины (а не для объемных элементов) с жестко закрепленными гранями по бортам и дну, т.е. даже без учета коэффициента постели.

Данное схематичное представление о динамике сооружения легло в основу системы наблюдений, что негативно отразилось в ее качестве. Во-первых, судя по отмеченным точкам, для регистрации форм использовалось слишком мало точек (а для высших форм 6, 7) даже меньше, чем требуется по теореме Котельникова, т.е. эти колебания, даже при условии их синусоидальной формы выделены недостоверно. Кроме того, нет точек на краях (в местах закрепления), что не позволяет судить о важном конструктивном узле. Вызывает смущение и достаточно высокое значение частоты первой формы (1 Гц) для такого крупного объекта, что плохо согласуется с современными представлениями строительной науки.

Существенным недостатком обработки полученных сейсмометрических данных является использование в качестве основы для выделения собственных колебаний расчетных значений частот при соответствующем уровне воды (УВБ), а не реальных, полученных путем спектрального анализа и обладающих рядом признаков (обсуждалось выше). Таким образом, редкая сеть наблюдений и использование в качестве основы обработки неподходящих для этого моделей, ставит под определенное сомнение полученные результаты.

Приведем также картину распределения амплитуд собственных колебаний по фасаду плотины (рисунок 4.12), приводимых авторами в (*Селезнев и др., 1998; Активная сейсмология..., 2004*). Заметим, что для получения картины подобной детальности необходима система наблюдений примерно в 100 раз более густая, чем была в эксперименте, особенно по высоте, где можно расположить датчики только в галереях. Удивляет необыкновенная симметричность детальной картины и «правильность» ее как по длине плотины, так и по высоте. Такие обследования не позволяют выявить даже рукотворные «дефекты»: деформационные швы, галереи и пр., что требует существенной доработки методики.



Рисунок 4.12 – Результаты сейсмометрического обследования плотины Саяно-Шушенской ГЭС – амплитуды основных собственных колебаний по фасаду плотины (*Селезнев и др., 1998; Активная сейсмология..., 2004*)

Таким образом, приведенная идеология создания модели Гунибской плотины и перебор моделей (1-8) иллюстрирует первый основой этап, за которым следуют уточнения расчетной модели. Для этого необходимо не только учет структурных особенностей сооружения, но дополнение модели данными инженерно-геологических изысканий, выполненных при строительстве, а также детальными визуальными и сейсмометрическими наблюдениями в зоне сочленения плотины с берегами.

4.4.3 Экспресс-оценка состояния плотины с использованием вибраций от автотранспорта

Гребень плотины очень часто используют для проезда автотранспорта, либо дорожное полотно проходит в непосредственной близости от плотины. Вибрации от транспорта можно использовать для получения первого приближения при оценке состояния бортовых примыканий плотины. Подобный подход рассмотрим на примере Гунибской ГЭС, Республика Дагестан, особенностью конструктивного решения является

наличие автомобильного моста, непосредственно соседствующего с гребнем плотины (рисунок 4.13). Микросейсмические колебания от автотранспорта обычно характеризуют спектрами мощности, иногда – пиковыми значениями амплитуд колебаний. На рисунке 4.14 приведены одновременные записи сейсмического сигнала при движении автомашины акселерометрами, установленными на автомосту и гребне плотины.



Рисунок 4.13 – Вид на Гунибскую ГЭС, Республика Дагестан



Рисунок 4.14 – Акселерограммы движения автомашины, регистрация на мосту и на гребне плотины Гунибской ГЭС

Сопоставление записей показывает следующее:

- вибрации от автомашины прекрасно регистрируются на мосту и практически отсутствуют на плотине, т.е. динамическое воздействие автомашин на плотину дополнительно к естественным микросейсмам можно считать ничтожным,

- движение автотранспорта вызывает собственные колебания моста, которые отчетливо проявляются на записях (см. Z-компоненту, низкочастотный цуг в середине записи). Пиковые величины ускорений не превышают 0.002 g (0.02 м/c²).

Для выявления спектров транспорта было взято отношение спектров записей при движении машины и без нее (рисунок 4.15). Отчетливо видны резонансные возбуждения собственных колебаний моста, вызываемые машинами (ниже 5 Гц – пики на собственных частотах 1.95 Гц и 2.54 Гц, пик на 19 Гц). Диапазон 5-8 Гц проявляется на всех компонентах и согласуется с данными других источников по частотному диапазону, характерному для автотранспорта (*Капустян, Юдахин, 2007*). К транспортным частотам относится и пики на частотах до 17 Гц. Отчетливый максимум на 75 Гц в направлении вдоль дороги связан с торможением транспорта.



Рисунок 4.15 – Экспериментальные определения горизонтальных радиальных перемещений (в мкм) точек арочной плотины Гунибской ГЭС на собственной частоте 0,47 Гц (а) и спектры мощности ускорений колебаний, создаваемых автомобилем при движении у береговых примыканий (б)

Анализ рисунка 4.15 показывает не только очевидный факт, что движущиеся автомашины возбуждают собственные колебания моста. Сравнение параметров возбужденных собственных колебаний показывает, что на левом (по течению реки) краю

моста эти колебания больше по амплитуде и проявлено большее число мод (пиков в спектре), причем даже просматривается классическая картина экспоненциального ослабления амплитуд высших мод. На правом краю доминирует первая мода. Такая ситуация невозможна при жестко закрепленном правом крае моста и очень характерна для «раскрепленного» по опоре моста, что и было подтверждено детальными исследованиями с заданием расчетной модели (см. п.4.4.2).

4.5 Методы мониторинга гидроагрегатов

Системы технической диагностики и мониторинга гидроагрегатов (ГА) получили бурное развитие в 80-х годах прошлого века. Наиболее известны были системы фирм Vibro-System (совместно с Vibro-Meter) (*Goodeve et al., 1994*), Bently Nevada (ГК «Новые *технологии»*), ABB (Эриксон, Эриксон, 1992). Предполагалось, что такие системы могут способствовать снижению эксплуатационных затрат за счет своевременного выявления неисправностей и проведения ремонта по состоянию.

Любая система мониторинга осуществляла следующие основные функции:

 – регистрация отдельных параметров, являющихся критическими для каждого агрегата;

- гибкая адаптация системы для каждого агрегата;

 – сигнализация при обнаружении неисправности (превышении критического уровня сигнала);

- удобное представление полученных результатов.

Одним из направлений развития систем мониторинга и диагностики была оптимизация количества устанавливаемых первичных датчиков, позволяющих характеризовать текущее техническое состояние ГА. Также большое внимание уделялось характеристикам датчиков, что было необходимо для регистрации сигналов в интересующем диапазоне частот и воздействий.

В настоящее время на российских ГЭС широко используются различные системы мониторинга и диагностики гидроагрегатов как российских (ОАО «НПО ЦКТИ» (Иванченко, Прокопенко, 2011), групп компаний «Ракурс» (ГК «Ракурс»), «Диамех» (ГК «Диамех»), фирмы ОРГРЭС (Незаметдинов, 2013), ООО «Эмерсон» (ООО «Эмерсон»), ОАО «НПО Промавтоматика» (ОАО «НПО Промавтоматика»...) и др.), так и зарубежных (Канада – Vibro-System (Goodeve et al., 1994), США – Bently Nevada (ГК «Новые технологии»), Швеция – АВВ (Эриксон, Эриксон, 1992), Австрия – AndritzHydro (Andritz),

Япония – (*Yamaguchi, 1990*) и др.) производителей, отвечающих указанным выше нормативным требованиям и построенные по аналогичным принципам.

Современные системы и мониторинга и диагностики гидроагрегатов предназначены для проведения технологического контроля, осуществления защиты и диагностики ГА по вибрационным и механическим параметрам. Датчики, обычно входящие в стандартный комплект системы мониторинга, используются для измерения следующих параметров:

- вибрация опорных узлов;
- биение вала;
- вибрация сердечника статора;
- вибрация лобовых частей;
- вибрация в пазовых частях;
- воздушный зазор;
- магнитный поток;
- температура полюсов ротора;
- положение ротора агрегата;
- кавитация.

Следует отметить, что большинство эксплуатируемых сейчас систем фактически осуществляют только мониторинг состояния, т.е. сбор и обработку необходимых сведений в автоматическом режиме. Функция диагностики по сути сведена к сравнению максимальных или осредненных величин с предельно-допускаемыми значениями, как правило, имеющими два уровня: предупредительный и аварийный. Это не противоречит требованиям действующей нормативной базы, но не позволяет в полной мере проводить оценку технического состояния ГА и оперативно отслеживать происходящие изменения.

Наиболее чувствительными к различного рода изменениям технического состояния ГА являются вибрации, регистрируемые на опорных узлах ГА. Каждому пику в снимаемых вибрационных спектрах можно найти объяснение, связанное с природой происхождения действующих на узлы агрегата сил: гидродинамического характера, механического толка, электромагнитного характера.

4.5.1 Математическое моделирование состояния гидроагрегатов

«ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и ОАО «НПО ЦКТИ» разработали математические модели для отображения изменения состояния ГА по результатам мониторинга контрольно-измерительными системами. Неизменность во времени спектров частот колебаний ГА означает его неизменное техническое состояние, которое можно

сопоставить с нормальным (технически исправным) состоянием. С другой стороны, изменение спектра (смещение пиков амплитуд колебаний ГА), увеличение или уменьшение амплитуды колебаний измеряемого параметра в процессе эксплуатации сигнализирует об изменении технического состояния ГА. В основе связи между результатами мониторинга вибрационного состояния и технического состояния ГА лежит изменение жесткости конструкции при образовании и развитии дефекта: появление трещины снижает жесткость конструкции и тем самым понижает значения частот собственных колебаний. На примере радиально-осевого (РО) ГА с двумя направляющими подшипниками показана принципиальная возможность обнаружения связи между изменением спектра собственных частот конструкции и наличием дефекта типа трещин. Собственные частоты рассматриваемого ГА определялись методом конечных элементов с помошью многоцелевого универсального программного комплекса «ANSYS», предназначенного, в том числе, для решения комплексных задач механики. Использованная расчетная 3D-модель и формы колебаний представлена на рисунке 4.16 (Научно-технический отчет..., 2017).



Первая форма, 6,97 Гц



Вторая форма, 8,25 Гц



Третья форма 9,9 Гц



Четвертая форма 11,9 Гц



Пятая (крутильная) форма 16,7 Гц



Шестая (аксиальная) форма 26 Гц

Рисунок 4.16 – Математическое моделирование колебаний ГА (Научно-технический отчет..., 2017)

Наиболее частым случаем обнаружения трещин на РО турбинах является место сопряжения лопасти со ступицей РК со стороны выходной кромки. Поэтому в модель колеса была заложена расчетная трещина вдоль линии сварного шва приварки лопасти к ступице, начинающаяся от выходной кромки (*Научно-технический отчет..., 2017*). Была проведена серия расчетов с различными длинами трещин с целью идентификации наличия трещины по изменению собственных частот РК. Некоторые результаты расчетов представлены на рисунке 4.17: перемещения, соответствующие одиннадцатой форме собственных колебаний РК, в исходном состоянии и при наличии трещины длиной l = 0,45b (b - ширина лопасти) на одной из лопастей. Положение трещины указано пунктирной линией. Собственная частота меняется мало: $f = 0,94f_0$, где f_0 – частота РК без трещины, f – частота с трещиной длиной b. Но такое изменение частот уже может быть диагностировано с помощью систем мониторинга непосредственно на агрегате или в удаленной точке при достаточной чувствительности датчиков.









Полученные результаты подтверждают возможность фиксации наличия трещин в лопастной системе по данным мониторинга агрегата контрольно-измерительными системами, находящимися непосредственно на агрегате. Кроме того, очевидно, что изменения амплитудно-частотного спектра также могут быть зафиксированы и на границе контакта «агрегат – плотина» при установке соответствующей аппаратуры в зонах сопряжения ГА со строительной конструкцией, а также в удаленных точках при наличии достаточно чувствительных датчиков.

4.5.2 Натурные наблюдения опасных процессов в гидроагрегатах

Особенностью проблемы является то, что существует достаточно много теоретических расчетов и компьютерного моделирования процесса взаимодействия агрегатов и водоводов, но экспериментальные сведения крайне скудны. Для понимания процессов, происходящей в этой системе, нами было проведено обобщение по литературным источникам, которое позволило представить следующую картину.

4.5.2.1 Опасные процессы в системе агрегат-водовод и их теоретическое объяснение

К настоящему времени характер процессов развития дефектов изучен в значительной мере (Окулов и др., 1995; Арм и др., 1996; Лобановский, 2013). Выделены основные группы дефектов гидроагрегата и причины их возникновения (Белоглазов, 2009, 2011): старение материалов и износ конструктивных узлов гидроагрегатов; недостатки проектирования и производства; недостатки транспортировки, хранения и монтажа; неудовлетворительная техническая эксплуатация и ремонты; применение недоброкачественных материалов; выход параметров окружающей среды за допустимые пределы, установленные технической документацией; перегрузки (длительные и/или кратковременные), значения, определяемые технической документацией. Выявлены превышающие характерные признаки возникновения возмущающих сил:

 для механических – наличие вибрации после закрытия направляющего аппарата (НА) при остановке агрегата;

 для гидравлических – исчезновение или значительное снижение вибрации при переводе гидроагрегата в режим синхронного компенсатора с освобождением от воды камеры рабочего колеса;

- для электромагнитных – увеличение вибрации при подаче возбуждения на холостом ходу агрегата.

В работе (Белоглазов, 2011) проводилось сопоставление динамики амплитуд основного тона биений вала для разных режимов, которое показало, что амплитуды меняются вдвое при изменении режимов работы.

Самыми опасными процессами считаются кавитационные явления. Существует большое количество публикаций, посвященных изучению аномальных пульсационных и кавитационных явлений. В основном, это математическое моделирование разной детальности с описанием стадий развития явления, например (*Singhal et al., 1997, Casoli et al., 2005, Быков и др., 2014; Панов и др., 2011; Панов, Чирков, 2012; Dekterev et al., 2015*).

Детально исследуется вопрос о том, при каких параметрах работы турбины (напор воды, нагрузка) развивается данное явление (*Бондаренко и др., 1987*). Сравнение с натурными наблюдениями также присутствует, но, в основном, как подтверждение правильности модели. Было установлено (*Абелев, Соловьева,* 1983), что кавитация возникает при специфическом соотношении напора воды и мощности турбины. Практическим приложением является разделение совокупности значений напор-мощность на зоны, в которых разрешена или запрещена работа турбины (пример приведен на рисунке 4.18) (*Брызгалов, 1998; Лобановский, 2009*).



Рисунок 4.18 – Типичные рабочие зоны радиально-осевой турбины СШГЭС: Zone I – безопасная работа, Zone II – не рекомендуется для использования, Zone III – рекомендуется для использования, Zone IV – работа временно запрещена

I зона лежит в пределах малых открытий НА и невелика, здесь турбина работает спокойно. Эта зона практического интереса не представляла из-за небольшой мощности агрегата, ограниченных возможностей её регулирования и недостаточной энергетической эффективности, вследствие низкого КПД.

II зона характеризуется неспокойной работой агрегата, увеличением уровня вибрации и пульсации потока, усилением кавитационного шума. Не рекомендуется для использования.

Ш зона имеет достаточный диапазон, отличается резким улучшением состояния агрегата, где почти исчезает кавитационный шум, сокращается величина вибрации и пульсации давления. В этой зоне достаточно высокие значения КПД.

IV зона характеризуется наибольшими значениями вибрации и пульсации давления. Здесь прослушиваются сильные удары кавитационного жгута. Работа турбины в этой зоне запрещается.

Предполагается, что причиной резкого возрастания нестационарных гидравлических процессов в проточной части турбин является гидроакустический резонанс, который

возникает при совпадении частот колебаний оси кавитационного жгута с собственной частотой упругих колебаний воды в напорном водоводе. Впервые теоретическое описание этого явления было опубликовано в работах (*Окулов, 1993; Окулов, Пылев, 1995*), в частности, оно рассмотрено применительно ко всей напорно-проточной системе высоконапорного гидроэнергоблока.

На основе проведенных экспериментов (*Брызгалов, 1998*) по сбросу повышенной нагрузки при работе ГА по сравнению с номинальной получено, что в разрешенном диапазоне работы турбин, в момент сброса нагрузки от влияния гидравлического удара, повышение давления в спиральной камере превышает расчетное на 15%. Важность проблемы стимулировала ряд работ численного моделирования процессов кавитационных явлений в гидротрубах. В частности, в работах (*Бондаренко и др., 1984; Кныш, Урывский, 1984; Дедков, Быков, 2002*) большое внимание уделено частотному составу колебаний и было обнаружено, что в спектре может появляться максимум с более низкой частотой, связанный с кавитационными явлениями.

Таким образом, явление кавитации изучено крайне фрагментарно. Отсутствуют модели возникновения жгута, которые давали бы четкое представлениях о параметрах колебаний, которые можно было бы измерить экспериментально.

4.5.2.2 Диагностики состояния системы турбина-водовод-плотина

Рассмотрим возможности современной сейсмической аппаратуры для регистрации колебаний, создаваемых при работе агрегатов ГЭС (пусками, гидродинамическими пульсациями в проточном тракте и пр.), а также способов комплексирования получаемых результатов с традиционными методами вибродиагностики. Постановка данной задачи актуальна, т.к. оснащение современными средствами наблюдений (датчиками и регистраторами) систем сейсмомониторинга ГТС на практических примерах показало возможность удаленной вибродиагностики, в первую очередь при анализе причин аварии на СШГЭС (*Селезнев и др., 2012*). В сейсмологической литературе существует ряд работ, связанных с регистрацией колебаний на оборотных частотах ГЭС на значительных расстояниях от них. Отметим только ряд работ: (*Bungum, 1977; Троицкий, 1980; Александров и др., 1981; Исследование Земли..., 1981; Капустян, Юдахин, 2007*) и многие др.

Предлагаемый подход не противоречит нормативным документам отрасли (СТО 70238424.27.140.032-2009, п. Г.2.1), где декларируется «единство природы регистрации параметров физических полей при выполнении этих двух видов наблюдений (инженерно-
сейсмометрического и сейсмологического) применяются принципиально одинаковые измерительные устройства». Отмечается, что «отличие состоит в технических характеристиках, оно определяется различиями в масштабах измерений и в частотных диапазонах регистрируемых сигналов», что закрепляет практику разделения средств регистрации для двух видов мониторинга, основанный на применении аппаратуры, хорошо опробованной на момент создания норматива. По существу, это разработки, выполненные на электронной базе рубежа веков (Храпков и др., 2007). Современные возможности, в первую очередь использование 32-битного АЦП и способов передачи данных снимают необходимость отмеченного различия, что успешно было показано в системе сейсмического мониторинга Чиркейской ГЭС (Antonovskaya et al., 2016). Частично полоса частот, анализируемая вибродиагностикой, также доступна сейсмометрическим наблюдениям. Это позволяет использовать данные сейсмомониторинга также и для дополнительного контроля работы агрегатов, что может служить подспорьем для вибродиагностики и увеличивает ее надежность. Кроме того, некоторые явления, как показано ниже, доступны предпочтительно сейсмометрическим наблюдениям. Проиллюстрируем нашими работами.

Здесь следует отметить важный момент, что мониторинг работы ГА для Чиркейской ГЭС был возможен и при функционировании, скажем так, «старой» системы мониторинга (система сейсмометрического мониторинга), которая была создана в последней четверти ХХ в. Сейсмический мониторинг состояния плотины осуществлялся Ивакиным А.Н., сотрудником лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии ИФЗ РАН, вплоть до 2011 г. Аналоговый сигнал собирался по проводам и передавался на центральный пульт, где затем оцифровывался, просматривался и хранился. Для того времени система была пионерской, но с определенными ограничениями. Вопервых, учитывая передачу аналогового сигнала по достаточно длинным линиям, система была настроена на «средний» порог чувствительности – на пуски агрегатов и местные сейсмические события. Во-вторых, запись велась не непрерывно, а по включению на превышение уровня, т.е. регистрировались только события. К 2011 г. техническое состояние системы находилось в весьма удовлетворительном состоянии, многие пункты наблюдений не функционировали, требовалась срочная ее модернизация.

В задачи данной системы не входил мониторинг ГА, тем не менее, записи рисунка 4.19 демонстрируют характерный сигнал на частоте около 2 Гц, амплитуда которого была в десятки раз интенсивнее обычного пуска. Сигнал возникал спорадически, был отмечен одновременно на всех датчиках и связан с работой агрегата № 4. Все это послужило

дополнительным обоснованием для выбора именно этого агрегата в качестве начального при проведении планового ремонта.



Рисунок 4.19 – Пример сейсмометрических записей работы агрегатов на ЧГЭС, любезно предоставленный Ивакиным А.Н.: слева – типовой пуск, справа – участок повышенной вибрации при работе агрегата № 4 – запись (вверху) и ее амплитудный спектр (внизу)

Аппаратура и описание экспериментов. Поставленная выше задача опирается на два вида данных: модельные, полученные на испытательном стенде СКБ «Гидротурбомаш» ЛМЗ ОАО «Силовые машины», и натурные – обработка материалов системы сейсмомониторинга Чиркейской ГЭС. По материалам системы сейсмомониторинга Чиркейской ГЭС анализировались записи в точках на галерее плотины (отм. 315), на береговых примыканиях (велосиметры СМ-3КВ), и в приплотинных машзалах (акселерометры Guralp CMG-5T). На испытательном стенде устанавливались 3-х компонентные датчики: акселерометры Guralp CMG-5T и 5TD (*Guralp Systems*), а также инновационные разработки: датчик крутильных колебаний (скорости поворота) МЕТR-03 (*Высокочувствительные сейсмические датчики*) и регистратор ADAS3 (*TУ 4314-71332728-003-2013*) (рисунок 4.20). Получаемые данные сравнивались с записями датчика виброперемещений ИВП-05-0,8/200 (Преобразователь виброперемещений).

Расположение датчиков: акселерометры устанавливались на крышку турбины, на станину стенда, на пол вблизи стенда и на расстоянии примерно 15 м от стенда. Записи, полученные в разных точках, принципиально не отличались по информативности наблюдаемых процессов, что обосновывает возможность вибродиагностики, удаленной от агрегата. Крутильные колебания записывались в точке на крышке турбины. Направление

осей регистрации: ось 1 – поперек потока, 2 – вдоль потока, 3 (Z) – вертикальная. Датчики ИВП-05-0,8/200 крепились одновременно сбоку и сзади отводящей трубы стенда.



Рисунок 4.20 – Датчики на плите, эксперимент по сравнению данных: CMG-5T разной чувствительности 1g (1) и 0.1 g (2), 3-CMG-5TDE, 4-METR-3, 5-ИВП

На стенде испытания велись для модели рабочего колеса поворотно-лопастной турбины ПЛ 20/5031-В-46, z1=4, φ=const=17,50, что подобно РО турбине, установленной на Чиркейской ГЭС. Было задано 9 режимов работы (№1...9), соответствующих как оптимальным, так и нерекомендуемым режимам эксплуатации. Параметры режимов показаны точками на так называемой пропеллерной характеристике турбины (рисунок 4.21).



Рисунок 4.21 – Пропеллерная характеристика и режимы испытаний на стенде (точки, цифры – номера режимов)

Далее рассмотрены результаты по режимам № 5, 6, 7, из которых режим № 6 соответствует оптимальным условиям. В двух других предполагается присутствие

кавитационного жгута, причем направление его вращения противоположно для режимов № 5 и 7. Обработка полученных данных проводилась по следующей схеме:

1) визуальный просмотр записей с учетом пометок в Дневнике наблюдений, отбраковка некондиционных записей и участков с помехами, вызванными посторонними причинами,

2) подбор параметров расчетов спектров мощности: количества точек в спектре (разрешения по частоте), числа окон суммирования спектров для уменьшения дисперсии случайной компоненты и для выявления устойчивых пиков, более подробно методика описана в работах (*Капустян, Юдахин, 2007; Юдахин и др., 2007*), принят расчет спектра по 1024 точкам с суммированием 20 окон,

3) тотальный расчет спектров мощности записей: для всего времени наблюдения в скользящем временном окне, представление в 3D виде как спектрально-временная диаграмма (CBAH), и для выбранных моментов наблюдений, представление в виде 2D графиков (значение спектральной мощности – частота),

4) сопоставление графиков, полученных одним датчиком в разных режимах работы стенда, данных по разным датчикам, в том числе при необходимости - пересчет из ускорений в смещения. Для сравнения с датчиком ИВП производился пересчет в абсолютных уровнях с учетом характеристик датчиков.

4.5.2.3 Результаты сравнения датчиков

Рассмотрим результаты сравнения датчиков: стандартных сейсмометрических и для вибродиагностики (СМG-5Т и ИВП-05-0,8/200), которое проводилось при одновременной записи сигналов. Наиболее информативным для изучения особенностей процессов является оценка спектров мощности – в виде кривой и в виде трехмерного поля при спектрально-временном анализе (СВАН) – расчете спектра в окне, скользящем вдоль записи.

Спектры мощности колебаний, записанные датчиками ИВП-05-0,8/200 и Zкомпонентой акселерометра на крышке турбины (в пересчете в виброперемещения) приведены на рисунке 4.22. Для акселерометров здесь и далее приведены спектры мощности только Z-компоненты, т.к. для всех трех (1, 2, Z) спектры подобны. Сравнение спектров на рисунке 4.22 показывает их принципиальную сопоставимость, особенно в полосе частот, начиная с 7-8 Гц и выше. В низкочастотной области виброперемещения, полученные непосредственно на трубе (сбоку и сзади), существенно более интенсивные,

чем на крышке турбины, что возможно, связано с частичным гашением этих колебаний в разных частях установки.



Рисунок 4.22 – Сравнение спектров мощности колебаний в режимах № 5…7, записанных датчиками: Z-компонентой CMG-5T, ИВП-05-0,8/200 при креплении сбоку (ИВПб) и сзади (ИВПз) отсасывающей трубы

Отметим следующее:

- пики, соответствующие оборотной частоте f_0 лучше видны (более интенсивные пики) на записях акселерометров,

- спектры с ИВП-05-0,8/200 в точках сбоку и сзади трубы могут различаться, причем пики оборотных частот могут пропадать (режим № 6, датчик сзади),

- на всех режимах спектров акселерометра присутствует достаточно широкий максимум на частотах $f_1 \approx 8$ Гц, причем $f_1 \approx 0.7 f_0$, что указывает на возможность проявления на кривых кавитационного жгута. Соотношение амплитуд колебаний на частотах f_1 и f_0 составляет примерно 1:2 для режима № 7 и примерно 1:4-1:5 для режимов № 5 и 6. Заметим, что на спектрах ИВП-05-0,8/200 эти максимумы менее выражены.

Сопоставление спектров наблюдений с использованием «линейных» датчиков (акселерометров и ИВП-05-0,8/200) и крутильных затруднено из-за сложностей

приведения к единой величине, но возможно при анализе временных изменений по CBAHдиаграммам, в первую очередь в связи с выявлением вращений на «жгутовых» частотах.

4.5.2.4 Выявление гидродинамических пульсаций

Сравним СВАН-диаграммы для режимов № 5, 6, 7 (рисунок 4.23), записанных акселерометром и датчиками виброперемещений и крутильных колебаний (приведена наиболее выразительная картина для компоненты 2 – вращения в плоскости, перпендикулярной потоку). Анализ данных показывает, что если для линейных датчиков режимы слабо различимы, то для крутильного датчика поля существенно иные. Помимо постоянно присутствующей оборотной частоты (в виде устойчивой во времени вертикальной полосы), в режиме № 7 появляется устойчивая полоса на частотах 7-8 Гц. В режиме № 6 эта частота отсутствует, а в режиме № 5 в данной полосе частот наблюдаются хаотичные пульсации в виде пятен. На СВАН-диаграммах для линейных датчиков явного присутствия обсуждаемой частоты не видно, но отмечаются всплески мощности в этом диапазоне частот.

Еще более интересную картину дают поля когерентно-временного анализа (КВАН) – меры синфазности сигналов на разных компонентах регистрации для крутильного датчика (рисунок 4.24). Заметим, что вращение РК вокруг оси 3 (Z), не создающее циркуляции водного потока в других плоскостях, не даст значения когерентности более 0.5, что отмечается для режима № 6 на оборотной частоте (для пар осей вращения 3-2 и 1-2). Когерентность для пары осей вращения 3-1, возможно, зашумлена движениями, возникающими вследствие особенностей стенда. Отчетливые полосы на частотах 7-8 Гц и около 12 Гц на КВАН-диаграмме для пары осей 1-2 при режиме № 7 указывает на круговые нисходящие вращения, что может ассоциироваться с возникновением кавитационного жгута (рисунок 4.24). В режиме № 5 эти вращения происходят с частотой, равной оборотной.

Таким образом, сейсмометрический датчик крутильных колебаний представляется эффективным инструментом для мониторинга возникновения гидродинамических пульсаций. Линейные датчики – акселерометры и виброперемещений также позволяют увидеть данный эффект, но менее ярко.



Рисунок 4.23 – СВАН-диаграммы колебаний, записанных одновременно датчиками: акселерометром СМG-5T (слева), крутильным МЕТR-03 (в центре) и ИВП-05-0,8/200 сзади трубы (справа), режимы № 5…7



Рисунок 4.24 – КВАН-диаграммы (а) записи колебаний в режимах № 5...7 компонентами 1...3 крутильного датчика, вверху схематически показаны анализируемые пары компонент и фото кавитационного жгута (б)

4.5.2.5 Натурные наблюдения вибромониторинга на Чиркейской ГЭС с использованием датчиков системы сейсмомониторинга

Рассмотрим возможность контроля работы гидроагрегатов с использованием системы сейсмического мониторинга, в частности контроля гидродинамических пульсаций. На рисунке 4.25 приведена СВАН-диаграмма записи акселерометра, установленного в машзале (компонента по потоку), на которой отчетливо видны оборотные частоты: основного тона f_0 =3.33 Гц и обертоны 6.66; 9.99 Гц. В средней части СВАН-диаграммы кружком отмечена область, в которой появляются колебания с частотой примерно 2.7-2.8 Гц, что указывает на возможность проявление здесь кавитационного жгута.



Рисунок 4.25 – CBAH-диаграмма записи системой сейсмомониторинга ЧГЭС колебаний в машзале и параметры работы на диаграмме характерных зон агрегатов ЧГЭС

Анализ условий функционирования агрегата по суточной ведомости и сопоставление с характерными зонами работы агрегатов ЧГЭС показывает, что отмеченная ситуация произошла при быстром сбросе мощности со значения на границе разрешенной и не рекомендуемой зон при уходе в другую не рекомендуемую зону. Ситуация была исправлена при резком увеличении мощности, что отразилось на СВАН-диаграмме в исчезновении колебаний с частотой примерно 2.7-2.8 Гц. Отметим, что появление низкочастотных колебаний было зарегистрировано практически во всех точках системы – на плотине и на береговых примыканиях, но там картина менее яркая, чем на рисунке 4.25.

Другие возможности современной системы сейсмического мониторинга иллюстрирует рисунок 2.11 (гл. 2), на котором приведены записи близких по времени событий: местного землетрясения и пуска агрегата. Реализованный динамический диапазон системы мониторинга позволяет увидеть оба эти события на сейсмограммах, полученных в точках регистрации и на плотине, и на береговых примыканиях, и в машзале, особенно после применения фильтрации для выделения землетрясения в машзале. Заметим, что при комплексировании систем сейсмомониторинга и виброконтроля вопрос о разделении ударных явлений, связанных с перемещением агрегатов от внешних событий (землетрясений), решается простым сопоставлением амплитуд колебаний в разных точках и может выполняться автоматически.

Анализ интенсивности колебаний (сейсмической балльности в точке наблюдения) показывает, что пуски агрегатов могут оказывать значительные сейсмические воздействия как на конструкции машзала, так и на основании всего сооружения, причем могут достигать 3-4 баллов. Учитывая, что таких пусков на Чиркейской ГЭС может быть до 4-5 в день, эти вибрации могут менять свойства геологической среды основания сооружения. Тут возможен ряд сценариев развития процессов – от раздробления среды до улучшения ее сейсмических свойств путем снятия части тектонических напряжений (своеобразный «вибромассаж» среды) (*Николаев, 1991*).

Детальное изучение записей пусков агрегатов ЧГЭС показало, что система чувствительного сейсмомониторинга на плотине дает возможность регистрировать низкочастотные колебания столба воды в водоводе, предваряющее высокочастотное вступление сигнала в машзале (рисунок 4.2). Качество регистрируемых волновых форм колебаний водовода позволяет применять к сигналам процедуры анализа, развитые в сейсмологии, что может быть основой мониторинга интегрального состояния водоводов.

Таким образом, проведенные модельные и натурные эксперименты с целью выявления возможностей современной сейсмометрической аппаратуры для регистрации колебаний, создаваемых при работе агрегатов ГЭС и гидродинамическими пульсациями в проточном тракте, а также способов комплексирования получаемых результатов с традиционными методами вибродагностики показали следующее.

1. Современные аппаратурные средства сейсмической регистрации, в частности система сейсмомониторинга установленная на Чиркейской ГЭС, позволяют выявлять особенности совместной работы системы турбина-водовод-плотина и, что существенно, в так называемых «удаленных» точках наблюдений, расположенных не непосредственно на теле контролируемого объекта. Это дает дополнительные возможности для увеличения надежности вибродиагностики агрегатов путем дополнения ее результатов данными с системы сейсмомониторинга. Анализ сейсмограмм пусков и колебаний водоводов

позволяет расширить возможности мониторинга состояния ГТС и следить за процессами в плотине и в геологической среде, ранее изучавшихся эпизодически.

2. На экспериментальном материале, полученном на испытательном стенде ЛМЗ ПАО «Силовые машины», и в процессе мониторинга на Чиркейской ГЭС ПАО «РусГидро» - «Дагестанский филиал», показаны возможности регистрации и методы обработки данных для оперативного мониторинга следующих явлений:

- гидравлических возмущений в проточном тракте гидротурбины,

- пусков гидроагрегатов с оценкой интенсивности сейсмических воздействий (балльности) в машзалах, а также связанных с ними колебаний в водоводах.

Проведенные обеспечения исследования открывают новые перспективы безопасности ГТС комплексирования путем систем вибрационного контроля гидротурбины и сейсмомониторинга плотины оборудованием нового поколения, что позволяет повысить надежность мониторинга состояния и работы турбин при использовании параллельно независимых систем наблюдения, что существенно для понимания физики процессов.

4.5.3 Анализ проявлений отклонений от штатной работы агрегатов

В этом разделе рассматриваются данные, полученные нами путем анализа колебаний, регистрируемых системой сейсмомониторинга ЧГЭС. Наблюдаемые явления сравниваются с немногими литературными данными.

Отклонения от штатной работы агрегатов выявляются в режиме реального времени на записях как датчиков на плотине, так и в машзалах. Датчики (см. раздел 2) позволяют судить о совместной работе системы агрегат-водовод, что проявляется в возникновении низкочастотных колебаний, уверенно регистрируемых датчиками на плотине ЧГЭС, в том числе на отм. 315 м (рисунок 4.2). Был рассмотрен набор записей пусков агрегатов, среди которых отмечены как «нормальные», так и «аномальные» пуски, представленные как бы несколькими повторными пусками, следующими друг за другом. Отметим, что такие явления кратковременны, длительность их, как правило, от нескольких минут до 1 часа. Другой пример (рисунок 4.26) относится к нештатной работе агрегата, вызывающей цуги колебаний на частотах 2 и 4 Гц, т.е. на частотах собственных колебаний плотины. Они могут быть продолжительными – до нескольких часов. Следует отметить, что подобное явление наблюдалось не только на Чиркейской ГЭС, но и на Бурейской ГЭС (*Храпков и др., 2007*).

JU CHRK1[SU1N] 50.000 samples/	2013-Sep-12							
- 49 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 1				Married - 110 - 1 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 -	and the party of the party of			
07:58:48	08:04:30	08-10-12	08-15-54	08:21:36	08-27-18	08:33:00	08-38-42	08-44-24
CHRK1[S02N] 50.000 samples/	2013-Sep-12	00.10.12	00.10.04	00.21.00	00.27.10	00.00.00	00.00.42	00.44.24
A sale of 1	1 mail the	and all	1		1		1	
Hall Pille in a	Lubrallant			and the second s			and a second	
	مساحدته أحيد المليه	A. Automatical		and the state of t			and the second se	
Build if the da in l.	L MALL M LIM LINI	I IMLE CAL						
07:58:48	08:04:30	08:10:12	08-15-54	08:21:36	08-27-18	08:33:00	08-38-42	08:44:24
CHRK1[S03N] 50 000 samples/	2013-Sep-12	00.10.12	00.10.04	00.21.00	00.27.10	00.00.00	00.30.42	00.44.24
		1						
		+						
****		+ +++++++++++++++++++++++++++++++++++++	D6 CHRK1[S02	N] 50.000 samples/s 2013-Sep-12				
07:58:48	08:04:30	08:10:12	D6 CHRK1[S02	NJ 50.000 samples/s 2013-Sep-12	anna ann ann ann ann ann ann ann ann an	and white the second		unusananana.
07:58:48 CHRK1[S04N] 50.000 samples/	08:04:30	08:10:12		N 50.000 samples/s 2013-Sep-12			National States of States	(())napernana
07:58:48 CHRK1[S04N] 50.000 samples/	08:04:30 ;2013-Sep-12	08:10:12		NI 50.000 samples/s 2013-Sep-12			nation and the state of the sta	Hilton water da
07:58:48 CHRK1[S04N] 50.000 samples/	08:04:30 ;2013-Sep-12	08:10:12	08:09:50	NJ 50.000 samples/s 2013-Sep-12	08:10:20	08:10:30 0	8:10:40 08:10:50	08:11:00
07:58:48 CHRK1[S04N] 50.000 samples/ 07:58:48	08:04:30 ;2013-Sep-12_ 08:04:30	08:10:12	08:09:50 08:15:54	NJ 50.000 samples/s 2013-Sep-12	08:10:20 08:27:18	08:10:30 0 08:30:00	8:10:40 08:10:50 08:38:42	08:11:00
07:58:48 CHRK1[S04N] 50:000 samples/ 07:58:48 CHRK1[S11N] 50:000 samples/	08.04.30 (2013-Sep-12 08.04.30 (2013-Sep-12	08:10:12	08:09:50 08:15:54	N 50 000 samplesis 2013-Sep-12 06:10:00 06:10:10 06:21:36	08:10:20 08:27:18	08:10:30 0 08:33:00	8:10:40 06:10:50 08:38:42	08:11:00 08:44:24
07:58:48 CHRK1[\$04N] 50:000 samples/ 07:58:48 CHRK1[\$11N] 50:000 samples/	08.04.30 (2013-Sep-12 08.04.30 (2013-Sep-12 (2013-Sep-12)	08:10:12	08:09:50 08:15:54	NJ 50 000 samples/s 2013-Sep-12	08:10:20 08:27:18	08:10:30 D 08:33:00	8:10:40 08:10:50 08:38:42	08:11:00 08:44:24
07:58:48 CHRK1[S04N] 50:000 samples/ 07:58:48 CHRK1[S11N] 50:000 samples/	08.04.30 ,2013-Sep-12 08.04.30 ;2013-Sep-12_	08:10:12	08:09:50 08:15:54	N 50.000 samples/s 2013-Sep-12	08:10:20 08:27:18	08:10:30 C	8:10:40 08:10:50 06:38:42	08:11:00 08:44:24
07:58:48 CHRK1[S)(4N) 50:000 samples) 07:58:48 CHRK1[S11N] 50:000 samples/	08.04.30 ;2013-Sep-12_ 08.04.30 ;2013-Sep-12_	08:10:12	08:09:50 08:15:54	N) 50.000 samples/s 2013-Sep-12	08:10:20 08:27:18	08:10:30 0 08:33:00	8:10-40 06:10:50 08:38:42	08:11:00 08:44:24
07:58:48 CHRK1[504N] 50:000 samples/ 07:58:48 CHRK1[511N] 50:000 samples/ 07:58:48	06:04:30 2013-Sep-12 2013-Sep-12 2013-Sep-12 06:04:30 06:04:30	08:10:12	1 D6 CHRK1[502 08:09:50 08:19:54 08:19:54	N) 50.000 samples/s 2013-Sep-12	08:10:20 08:27:18 08:27:18	08:10:30 D 08:33:00 08:33:00	06:38:42	08:11:00 08:44:24 08:44:24
07:58:48 CHRK ([S040) 50:00 samples/ 07:58:48 CHRK [[S110] 50:00 samples/ 07:58:48 CHRK [[S010] 50:00 samples/	06:04:30 ,2013-Sep-12 ,2013-Sep-12 ,2013-Sep-12 ,2013-Sep-12 ,2013-Sep-12 ,2013-Sep-12	08:10:12	08:09:50 08:15:54	N) 50.000 samples/s 2013-Sep-12 08:10:00 08:10:10 08:21:36 08:21:36	08:10:20 08:27:18 08:27:18	08:10:30 0 06:33:00 06:33:00	08:38:42	08:11:00 08:44:24 08:44:24
07:58:48 CHRK1[504N] 50:000 samples/ 07:58:48 CCHRK1[511N] 50:000 samples/ 07:58:48 CHRK4 [506N] 50:000 samples	08:04:30 2013-Sep-12 2013-Sep-12 2013-Sep-12 2013-Sep-12 2013-Sep-12	08:10:12	08:09:50 08:15:54	N) 50.000 samples/s 2013-Sep-12	08:10:20 08:27:18 08:27:18	08:10:30 0 06:33:00 06:33:00	08:38:42 08:38:42	08:11:00 08:44:24 08:44:24
07:58-48 CHRX1[S04N] 50:000 samples/ 07:58-48 CHRX1[S11N] 50:000 samples/ 07:58-48 CHRX4 [S00N] 50:000 samples/	08:04:30 (2013-Sep-12 (2013-Sep-12 (2013-Sep-12 (2013-Sep-12) (2013-Sep-	08:10:12 08:10:12 08:10:12 08:10:12	08:09:50 08:15:54	NJ 50.000 samples/s 2013-Sep-12	081020 082718 082718	06:10:30 0 06:33:00 06:33:00	08 38 42 08 38 42	08:11:00 08:44:24 08:44:24
07:58:48 CHRK ([S040) 50:000 samples/ 07:58:48 CHRK [[S110] 50:000 samples/ 07:58:48 CHRK [[S010] 50:000 samples/	06:04:30 2013-Sep-12 06:04:30 2013-Sep-12 2013-Sep-12 06:04:30 2013-Sep-12	08:10:12 08:10:12 08:10:12	08:09:50 08:15:54	N) 50.000 samples/s 2013-Sep-12	08:10:20 08:27:18 08:27:18	08:10:30 0 06:33:00 06:33:00	08:30:42 08:30:42	08:11:00 08:44:24 08:44:24
07:58:48 3 CHRK1[504N] 50:000 samples/ 07:58:48 1 CHRK1[511N] 50:000 samples/ 1 CHRK4[S00N] 50:000 samples 5 CHRK4 [S00N] 50:000 samples	06:04 30 06:04 30 06:04 30 2013-Sep-12 2013-Sep-12 06:04 30 2013-Sep-12 06:04 30	08:10:12 08:10:12 08:10:12 08:10:12 08:10:12	08:09:50 08:15:54 08:15:54	N) 50.000 samples/s 2013-Sep-12	08-10-20 08-27-18 08-27-18 08-27-18 08-27-18	08:33:00 08:33:00 08:33:00	6 10 40 06 10 50 08 38 42 08 38 42 08 38 42	08.11.00 08.44.24 08.44.24 08.44.24 08.44.24

Рисунок 4.26 – Пример записи нештатной работы агрегата, амплитуды в машзале уменьшены, наиболее сильная вибрация отмечается на ст. 2, отм. 315 м. На врезке приведена развертка записи на ст. 2, радиальная компонента колебаний

В работе (*Тарасов, 2016*) указано, что в системе водовод-гидроагрегат-энергосистема возможно возникновение совместной формы собственных колебаний, частота которой f определяется в основном водоводом, причем $f \approx c/4L$, где с – скорость звука в воде (1500 м/с), L – высота столба воды. Подставляя значение L=170 м, получаем $f \approx 2.2$ Гц, что совпадает с полученными значениями возбуждаемых частот. Отмечено, что такие автоколебания сопровождаются сильной вибрацией и кавитацией, что является опасным для работы турбины.

4.6 Использование механических вибраций, создаваемых при работе ГЭС, для оценки состояния плотин

На рисунке 4.27 показаны результаты наших наблюдений в сравнении с литературными данными – спектры, генерируемые различными устройствами и сигналы промышленных объектов и автодорог (Юдахин и др., 2007; Сейсмологические исследования..., 2011). По типу излучаемых колебаний это либо гармонические (квазигармонические) или случайные сигналы (Иванова, 1964; Собисевич, Собисевич, 1999). Исследователей поражала «вездесущесть» сигналов определенных частот (гармонических) не только на дневной поверхности, но и на глубинах более 3000 м (Frantti, 1963) и даже в атмосфере (Liszka, 1974).



а – спектры микросейсм вблизи разнообразных электрических машин (Юдахин и др., 2007); б – спектры мощности микросейсм, содержащие техногенный пик, на берегу и на дне океанической котловины, Гавайи (Капустян, 2000)

Был предпринят поиск источников, которые соответствовали плотинам электростанций или мощным синхронным электрическим машинам. Было замечено, что частоты тонких линий в спектрах мощности подчинялись условию: $f_N = 50/N$, Γq , где N - целое число, как правило, число полюсов электромашин, т. е. связаны с электрической сетью. Аргументом, свидетельствующим о том, что данные сигналы связаны с работой мощных электрических машин, является, прежде всего, значение частоты. Например, в работе (Александров и др., 1981) были поставлены специальные наблюдения сигнала от Нурекской ГЭС, имеющей 15 пар полюсов. Рекогносцировочные наблюдения показали, что во всех исследуемых точках регистрируется как основной тон 3.(3) Γu , так и более высокие гармоники: 6.(6); 9.(9) и др., амплитуда сигнала убывает с ростом расстояния от ГЭС (Троицкий, 1980; Александров и др., 1981). Существенно также, что в работах (Александров и др., 1981; Сейсмический контроль..., 1990) сигнал от Нурекской ГЭС выделялся с помощью специально созданного устройства «следящего фильтра» синхронного коммутатора (Александров и др., 1980).

В спектрах микросейсм существенная часть излучаемой механической энергии приходится на высокочастотные колебания, тем не менее, для мощных агрегатов, и особенно электрических машин, колебания в низкочастотной части (20 $\Gamma \mu$ и ниже) присутствуют в спектре излучателя и наблюдаются достаточно далеко от источника (*Юдахин и др., 2005*). Из рисунка 4.27 видно, что на частотах до 20 $\Gamma \mu$:

- наибольшая мощность излучается именно квазигармоническими сигналами,

- на различных площадках устойчиво присутствуют пики на сетке частот,

Рисунок 4.27 – Примеры квазигармонических сейсмических сигналов, возбуждаемых мощными электрическими машинами

- на одном промышленном объекте может регистрироваться несколько источников, в том числе разнесенных по площадке.

Рассмотрим методику использования механических вибраций на примере регистрации сейсмических сигналов, создаваемых при работе гидроагрегатов Чирюртской ГЭС-1 (Республика Дагестан, Россия). В состав комплекса Чирюртских ГЭС входят 3 электростанции: Чирюртская ГЭС-1, Чирюртская ГЭС-2 и Гельбахская ГЭС (Чирюртская ГЭС-3). Комплекс является нижней ступенью Сулакского каскада. Все эти ГЭС имеют одну общую плотину.

Плотина Чирюртских ГЭС – насыпная грунтовая с глинистым ядром; длина – 430 м, максимальная высота – 37.5 м; ширина гребня – 9,5 м; заложение откосов: верхового от 1:2.5 до 1:3.5 низового от 1:2 до 1:2.25; в зоне переменного уровня верховой откос имеет крепление сборными железобетонными плитами (рисунок 4.28). Донный бетонный водосброс в теле земляной плотины совмещен с водоприемником; водосброс длиной 34 м имеет 4 пролета шириной по 7 м и рассчитан на пропуск 3000 м³/с воды; удельный расход на рисберме – 80 м³/с. По гребню плотины проходит автодорога с достаточно интенсивным движением автомашин. Схема сейсмического просвечивания представлена на рисунке 4.29.



Рисунок 4.28 – Поперечный разрез по плотине



1 – земляная плотина, 2 – здание ГЭС-1, 3 – деривационный канал, 4 – размещение датчиков Рисунок 4.29 – Схема просвечивания плотины Чирюртских ГЭС техногенными вибрациями от агрегатов ГЭС-1

Плотина грунтовая насыпная, поэтому частоты и амплитуды низкочастотных собственных колебаний плотины и более высокочастотных просвечивающих сигналов, создаваемых гидроагрегатами, существенно различаются. На рисунке 4.30 представлены амплитуды техногенных сигналов, записанных в точках наблюдения на профиле.



Рисунок 4.30 – Распределение амплитуд техногенных сейсмических сигналов на профиле по гребню плотины Чирюртской ГЭС-1

Сравним амплитуды по записям двух горизонтальных сейсмометрами (N – вкрест плотины, E – вдоль нее) и вертикального (Z). Видно, что кривые для разных компонент на частоте 6.25 Гц подобны, а кривые для 3.125 Гц различаются существенно. Подобие кривых N, E, Z компонент может говорить о том, что на частоте 6.25 Гц регистрируется смесь волн разной природы, а на 3.125 Гц – доминируют волны одного типа. Для проверки был проведен поляризационный анализ техногенных сигналов в промежуточной контрольной точке на расстоянии примерно 0.5 км от агрегатов и на гребне плотины (рисунок 4.31).



Рисунок 4.31 – Траектории движения частиц на расстоянии 0,5 км от агрегатов на частотах 6,25 Гц (а) и 3,125 Гц (b) и на частоте 3,125 Гц на гребне плотины (c) в плоскостях: слева – вертикальной, перпендикулярно лучу, справа – горизонтальной

Анализ траекторий движения частиц в техногенном сигнале показывает, что на частоте 3.125 Гц из источника «выходит» поперечная волна, которая затем складывается с поверхностной волной Рэлея. Для частоты 6.25 Гц из источника уже выходит смесь волн: продольной и поперечной. Все это согласуется с оценкой для ГЭС Хандерфоссен (Бунгум и др., 1981) и с профилем амплитуд рисунка 4.30.

Полученный результат важен для просвечивания, т.к. поперечные волны «чувствительны» к обводнению – оно приводит к резкому ослаблению амплитуд. С другой стороны, фундаментальная мода волны Рэлея обладает свойством увеличивать амплитуду вертикальной компоненты смещения вблизи низкоскоростных аномалий в геологической среде и уменьшать вблизи высокоскоростных (*Горбатиков и др., 2008*). Таким образом, данный техногенный сигнал является хорошим инструментом для выявления фильтрации флюида в тело плотины. Обратим внимание на то, что на рисунке 4.30 на компоненте «Е», преимущественной для поперечной волны наблюдается резкий спад в точке 220 м (середина плотины). При этом на компоненте «Z», преимущественной для Рэлея волны наблюдается максимум. Таким образом, в этом сечении плотины может существовать как повышенное содержание воды, так наличие мелких пустот как следствие суффозии. Все это возможно при повышении фильтрации воды сквозь плотину.

Несомненно, полученный результат требует более детального подтверждения и сопоставления с данными мониторинга фильтрации. Тем не менее, на представленную возможность следует обратить внимание как на путь совершенствования системы контроля состояния плотины, учитывая экономичность и технологичность способа. Это важно для безопасности, т.к. основными причинами разрушения грунтовых плотин являются:

- потеря статической устойчивости низовой призмы плотины;

- суффозия в основании плотины;

- суффозия в теле плотины;

- нарушение водонепроницаемости противофильтрационных устройств плотины,

- землетрясение выше расчетного;

- террористический акт.

Таким образом, для первых 4 типов процессов предлагаемая технология просвечивания плотин с помощью техногенной вибрации агрегатов ГЭС представляется эффективной. Рассмотрим еще один пример эффективного использования техногенных вибраций для оценки состояния плотин и района их размещения.

4.7 Комплексирование сейсмических методов для обследования плотин и районов их размещения

Использование сигналов от работающих промышленных источников в условиях высокого уровня промышленных вибрационных и электрических помех, застроенности территорий, наличия асфальтового покрытия, и пр., когда применение традиционных методик оказывается малоэффективным, представляется прекрасной возможностью для обследования антропогенных объектов. Информативность изучения верхней части разреза (ВЧР) может быть существенно увеличена с помощью применения новых геофизических технологий, использующих приемы комплексирования различных, иногда не очень «точных» методов. Результат, полученный при совпадении оценок нескольких независимых, но «грубых» методов, не менее достоверен, чем при применении более детальных исследований. В последнее время с развитием аппаратной и методической базы использование пассивных сейсмических методов, как правило микросейсмических, приобретает все большее значение в геофизических исследованиях (Горбатиков, 2006; Cheng F. et al., 2016; Draganov D. et al., 2009; Le Feuvre M. et al., 2015). Существенно, что для получения принципиально разной информации о среде зарегистрированное волновое поле может параллельно обрабатываться различными способами, опирающимися на разные «полезные» составляющие микросейсм. Нашей задачей было разработать методику, объединяющую совместно оценку состояния плотины и грунтов основания, использующую единый тип аппаратуры. Существенными факторами является:

- технологичность работ, т.е. проведение наблюдений малым числом датчиков, последовательно перемещаемых по сооружению и грунтовому массиву,

 получение представлений о состоянии объекта в целом и его основных частей (без мелкой детальности),

- возможность проведения обследования в любое интересующее время и без применения специальных источников сигналов, т.е. использование микросейсм.

Бетонная гравитационная плотина Song Tranh-2, расположенная в Центральном Вьетнаме, провинции Quang Nam, высотой около 80 м и длиной 640 м (рисунок 4.32) является основной в системе гидросооружений, она служит для создания водохранилища, используемого несколькими удаленными от нее ГЭС. Визуальное обследование плотины Song Tranh-2 говорит об ухудшении ее состояния, в том числе выявлены многочисленные дефекты в теле плотины (рисунок 4.33). Для дальнейшего использования плотины необходимо было оценить, насколько поверхностные дефекты затронули тело плотины и постараться выявить причину ухудшение состояния конструкций с использованием

неразрушающих сейсмических методов. Особенность района состоит в том, что там сложно использовать мощный многотонный геофизический вибратор, способный излучать требуемую низкую сейсмическую частоту.

Согласно данным, предоставленных нам вьетнамскими коллегами из Института геофизики Вьетнамской академии наук и технологии (ИГ ВАНТ), русло реки находится в грабенообразной структуре, по бортам которой выявлено большое количество разломов, направленных к оси грабена. В районе размещения плотины зафиксирована сейсмическая активность, выраженная множеством землетрясений различной магнитуды до $M\sim 5$ (*Le Huy Minh et al., 2017*).



Рисунок 4.32 – Бетонная плотина Song Tranh-2, Центральный Вьетнам (а) и схематический разрез плотины (b)



Рисунок 4.33 – Вид плотины после ремонта со стороны верхнего бьефа

Оба борта долины реки пронизаны многочисленными разломами северо-восточного и северно-западного простирания (рисунок 4.34). Мелкие разрывы по данным инженерных изысканий – близвертикальные, т. е. способные передавать флюид на глубину и активизировать геодинамические процессы наведенной сейсмичности, как это

наблюдалось для ряда высотных плотин (Gupta et al, 1982; Gupta, 1985; Капустян, Юдахин, 2007 и др.).



Рисунок 4.34 – Карта сейсмической активности района размещения плотины за 2011-2012 гг.

После землетрясения в районе водохранилища с М=4.7 вода была спущена до минимально допустимой отметки. Сотрудниками ГЭС проведены визуальные обследования плотины, которые выявили многочисленные участки дополнительного ослабления прочности: трещины (рисунок 4.35а), появление повышенной фильтрации воды в галереи плотины (рисунок 4.35b), что усугубляется дефектами бетона по всей поверхности плотины со стороны водохранилища (верхний бьеф, рисунок 4.33). Отмечено сгущение дефектов в нижней части тела плотины, иногда они объединяются в довольно протяженные зоны.



а – вид трещины с просачиванием воды, b – фильтрация воды внутри плотины
Рисунок 4.35 – Результаты визуального обследования плотины:

При проектировании плотина Song Tranh-2 рассчитывалась на устойчивость при землетрясении с M=5.5. Расчет на сейсмические воздействия (рисунок 4.36) показывает следующее:

- при колебаниях подвижны все части плотины, но особенно верхняя часть (примерно треть от высоты), т.е. в ней можно ожидать наибольшие разрушения,

- в колебаниях участвует не только тело плотины, но и грунты основания, что требует тщательного изучения их состояния после строительства плотины.



Рисунок 4.36 – Компьютерные модели плотины Song Tranh-2 для некоторых форм колебаний (данные ИГ ВАНТ)

В связи с этим в 2012 и 2013 гг. нами были проведены комплексные сейсмические исследования состояния тела плотины и грунтов района ее размещения.

4.7.1 Сейсмическая аппаратура и схема наблюдений

В 2012 г. использовалась аппаратура, имеющаяся в наличии в ИГ ВАНТ: четыре комплекта аналоговых велосиметров СМG-40Т фирмы Guralp (Великобритания) и регистраторов SAMTAC-801H (Япония). Технические характеристики этой аппаратуры позволили вести наблюдения сигнала в полосе частот 0.1–50 Гц с динамическим диапазоном 130 дБ. Привязка по времени осуществлялась по GPS приемнику, являющемуся частью аппаратуры, при наблюдениях внутри плотины – по внутренним синхронизованным часам. Частота дискретизации 100 Гц. При повторных измерениях в 2013 г. использовалось 7 комплектов цифровых велосиметров СМG-6TD фирмы Guralp.

Исследования состояния тела плотины проводились путем последовательного прохождения ряда профилей: по гребню плотины и внутренним галереям. Для каждого профиля выбиралась опорная точка в центре плотины, где мы устанавливали неперемещаемую станцию (*Antonovskaya et al., 2014*). При регистрации микросейсм вокруг

плотины Song Tranh-2 использовалась эта же сейсмическая аппаратура, что и при обследовании состояния тела плотины. В 2012 г. был пройден протяженный профиль в нижнем бьефе параллельно плотине вдоль ее основания на расстоянии 250 м от нее (рисунок 4.37а). В 2013 г. были выполнены детальные измерения для каждого берега по схеме, представленной на рисунке 4.376. Вблизи плотины шаг между точками наблюдений – 30 м, при удалении от нее до 50 м, далее до 100 м. Точки регистрации выбирались исходя из возможностей установки сейсмической аппаратуры.

В дополнении к пассивным сейсмическим методам, применялись активные – инженерная (малоглубинная) сейсморазведка (*Гурвич, Боганик, 1980*). Использовалась цифровая 24-х канальная сейсмическая станция «Geode» (*Geometrics..., 2017*). Прием сейсмических Р и S волн осуществлялся вертикальными и горизонтальными сейсмоприемниками. Возбуждение волн проводилось ударами кувалды весом 8 кг по плоской металлической плите для P-волн, для S-волн – по плашке, установленной под углом около 45° вкрест направления профиля.



Рисунок 4.37 – Схема прохождения профилей при регистрации микросейсм в районе размещения плотины Song Tranh-2 в 2012 г. (а) и в 2013 г. (б)

Система наблюдений, представленная на рисунке 4.38, была задана исходя из возможностей прохождения профилей по правому и левому борту плотины. Расстояние между приемными каналами варьировалось от 1 до 5 м, длина профилей наблюдений составляла от 24 до 120 м. Обработка материалов проводилась с помощью специализированных программ «RadExPro+» (*RadExPro..., 2017*), ZondST2d (*Zond..., 2017*) и при поддержке ООО «Геосигнал» (*Geosignal..., 2017*).



Рисунок 4.38 – Схема расположения сейсморазведочных профилей (1) и скважин (2)

4.7.2 Методики обследования

При изучении состояния плотины и ВЧР района ее размещения были поставлены следующие задачи:

 выявление участков неоднородности материала плотины по сейсмическому поглощению зондирующего сигнала и мониторинг изменения размеров и положения этих зон во времени;

- выявление особенностей примыкания тела плотины к бортам;

- выделение разрывных нарушений в ВЧР;

- выявление неоднородностей свойств грунтов основания, которые могут оказать влияние на ослабление конструкций плотины.

Использование постоянно присутствующих сигналов в поле микросейсм дает возможность вести рекогносцировочные наблюдения (например, обследование территории или объекта) с использованием даже небольшого количества сейсмических датчиков, перемещаемых по объекту (Юдахин и др., 2007; Горбатиков, Цуканов, 2011; Данилов и др., 2017). Отметим, что развивающаяся в настоящее время сейсмическая интерферометрия на микросейсмах (Cheng F. et al., 2016; Le Feuvre M. et al., 2015) по детальности исследования приближается к активным сейсмическим методам за счет одновременного использования большого количества регистрируемых пунктов наблюдения. Тем не менее, в условиях высокого уровня техногенных шумов (например, на площадках индустриальных объектов), активные сейсмические методы проигрывают по технологии, т.к. приходится увеличивать число накоплений воздействующего сигнала (например, число ударов). Рассмотрим комплекс методов, используемых для обследования объекта.

Зондирование объектов техногенными вибрациями. Как основную, мы применяли развиваемую нами методику просвечивание тела плотины и ВЧР района размещения плотины техногенными вибрациями от промышленных источников (Antonovskaya et al., 2014). Особенностью этих сейсмических сигналов являются вариации во времени значения частоты сигнала, т.к. эта величина определяется непостоянством частоты электросети, куда подключено устройство, создающее вибрацию. Характерные времена постоянства частот – десятки минут, поэтому для выделения сейсмических вибросигналов из помех на близких расстояниях достаточно выполнить расчет спектров мощности записи (с подбором нужного разрешения по частоте и количества осреднения). На удалениях в десятки километров уже требуется построение следящего фильтра с опорным сигналом электросети (Капустян и др., 2007). В нашем случае расстояния от работающих промышленных устройств – до 1 км, т.е. анализировались спектры мощности. Промышленные вибрации отчетливо проявляются в спектрах мощности микросейсм в виде соответствующих пиков (рисунок 4.39) на частотах 3.125 Гц и примерно 4.6 Гц. Сигналы на этих частотах были выбраны для просвечивания плотины и грунтов района ее размещения.



Рисунок 4.39 – Характерный пример спектра мощности микросейсм

Значения амплитуд пиков определяются рядом технологических факторов и достаточно быстро (десятки минут) меняются со временем, но расчет отношения значений амплитуд в точках наблюдения (i) и 0-контрольном пункте (*Ai/A0*) позволяет устранить временные изменения, получаемые в разных точках профилей при последовательном их прохождении и оставить только пространственную вариацию поля амплитуд. Важно, чтобы контрольный пункт и точки обследования находились на расстояниях, сравнимых с

длиной волны сигнала, тогда при «уплывании» частоты и, соответственно, изменении длины волны, погрешности в отношениях амплитуд будут невелики. Это позволяет избежать заметного искажения пространственной картины относительных значений амплитуд. Контрольный пункт при обследовании тела плотины располагался на сооружении, а при обследовании грунтов – на грунте.

Метод низкочастотного микросейсмического зондирования. Описание методики микросейсмического зондирования (ММЗ) и тестовые примеры приведены в (*Горбатиков, 2006; Горбатиков, Цуканов, 2011*). Метод основан на интерпретации поверхностных волн Рэлея, присутствующих в микросейсмах. Амплитуда поверхностной волны зависит от значения скорости ее распространения в среде, причем малым скоростям соответствуют большие амплитуды и наоборот. Исходя из свойств волн Рэлея по проникновению в разрез, интерпретация набора на разных частотах позволяет получать сведения о скоростях на разных глубинах под пунктом наблюдения. Эта особенность получаемых результатов определяет то, что ММЗ при прохождении профилей ориентирован на выделение близвертикальных неоднородностей. Были разработаны методики реализации ММЗ для различных задач и специализированный программный комплекс, позволяющий производить обработку данных в полевых условиях (*Ророv et al., 2014; Данилов и др., 2017*).

<u>Метод автокорреляционных функций</u>. Данный метод позволяет выделять сигналы, периодически возникающие во времени (*Schuster et al., 2004*). Метод основан не расчете автокорреляционной функции $\Psi(\tau)$:

$$\Psi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) f^*(t-\tau) dt,$$

где f(t) – сейсмограмма; τ – временной сдвиг; * – комплексное сопряжение.

Данная функция показывает степень сходства сигнала с копией самого себя, сдвинутой на величину τ . Максимумы функции соответствуют сигналам, совпадающим по фазе, а минимумы – сигналам в противофазах. В данном эксперименте рассчитывались автокорреляционных функций записей сейсмического шума для пунктов вдоль профилей для правого и левого берегов для исследования различия деформационных свойств зоны контакта плотины с геологической средой. Метод ориентирован на выявление колебаний, излучаемых в среду плотиной при ее колебаниях от ветровых пульсаций и волнении акватории.

<u>Метод многоканального анализа поверхностных волн.</u> Данный метод был впервые описан в работах (Al-Husseini et al., 1981; Mari, 1984; Gabriels et al., 1987) и в последующем развит в работе (Park et al., 1999). Метод позволяет получать скоростные

модели геологической среды под пунктами сейсморазведочных профилей на основе анализа дисперсионных свойств поверхностных волн. В основе метода многоканального анализа поверхностных волн лежит спектрально-волновое (f-k) преобразование сигнала с последующим его сложением по всем каналам (*Douze and Laster*, 1979).

<u>Метод малоглубинной сейсморазведки.</u> Основы метода изложены в (*Гурвич, Боганик,* 1980). Профильные исследования геологической среды выполнялись в зонах приближенных к контакту с плотиной для правого и левого берегов. По результатам обработки разрывные нарушения проявляются на временных разрезах как разрывы корреляции горизонтов, в ряде случаев с их вертикальными подвижками; на сейсмограммах – регистрацией в зонах разрывов интерференционной записи отраженных и рассеянных (боковых и дифрагированных) волн.

4.7.3 Анализ результатов исследований

На рисунке 4.40 представлены пространственные распределения относительных амплитуд сигналов (*Ai*/*A*0) на частоте 3.125 Гц за два этапа наблюдений с интервалом в год (2012 г. и 2013 г.). Тип волн, характеризующих техногенные вибрационные сейсмические сигналы, используемые для просвечивания, в данном случае нами не исследовались, поэтому трудно связать получаемые значения со скоростями в теле плотины, и, соответственно, с добавочными деформациями. Тем не менее, однородная пространственная картина соответствует однородному по прочностным свойствам материалу, а аномалии – зонам измененных свойств.

Как видно из рисунка 4.40а, по данным 2012 г. в левой части плотины присутствует яркая аномалия, которая по результатам визуального обследования (влажные стены, протечки воды) обрисовывает зону пониженной прочности в плотине. Намечаются ослабленные зоны и в центральной части тела плотины (синие пятна на рисунке 4.40а). Результаты 2013 г. подтверждают данные предыдущего года – в левой части плотины присутствует яркая аномалия, которая также по результатам визуального обследования показывает зону пониженной прочности в плотины характеризуется некоторым снижением прочности. Отметим, что в выявленных зонах получены большие относительные амплитуды, чем вокруг, т.е. возможно, по аналогии с MM3 мы имеем дело с волнами Рэлея. Существенно для интерпретации материалов просвечивания этими же сигналами ВЧР то, что факт деструкции материала дает высокую относительную амплитуду.



а – желто-красная область – ослабленная зона; б – разрез ММЗ по сводному профилю, отображающий скоростную дифференциацию верхней части земной коры, большие значения Ai/A0 соответствуют низким значениям скоростей, т.е. более «слабым» породам основания сооружения

Рисунок 4.40 – Результаты просвечивания тела плотины промышленными сигналами за 2012 и 2013 гг. (а) в сопоставлении с данными по методу микросейсмического зондирования (б)

Рассмотрим результаты зондирования ВЧР района размещения плотины на техногенной частоте 3.125 Гц для вертикальной составляющей регистрации, результаты для горизонтальных компонент подобны. Выполнено нормирование амплитуды сигнала на стационарную точку (рисунок 4.41).







Как видно из рисунка 4.41, для правого борта выделяются две аномальные области, одна из которых расположена в зоне контакта плотины с геологической средой. Большие значения амплитуды, по аналогии с плотиной, соответствуют более ослабленной (разуплотненной) среде. Можно предположить, что это зоны большей трещиноватости пород. Левый берег, судя по распределению сигнала на частоте 3.125 Гц, в зоне контакта с плотиной характеризуется менее ослабленной средой, чем правый.

По ММЗ выделяются контрастные близвертикальные неоднородности (рисунок 4.40б). Разбиение на блоки связано с разломной тектоникой района, а пониженные скоростные свойства в блоках – с трещиноватостью горных пород, отмеченной еще на стадии инженерных изысканий. Обратим внимание на желто-красные участки, соответствующие низкоскоростным зонам, по-видимому, «ослабленным» трещинами. Согласно рисунку 4.40б, основание и бортовые примыкания плотины для разных ее концов характеризуются существенно различными скоростными, и, следовательно, прочностными свойствами. Левый борт – более высокоскоростной (прочный), правый борт – более низкоскоростной, т.е. «ослабленный».

Проанализируем результаты метода автокорреляционных функций. Известно, что плотина является своеобразным источником квазикогерентного сигнала, связанного со стоячими волнами собственных колебаний плотины (Патент 2140625, Патент 2151234 Еманов и др., 2017). Ветер и прибой является факторами, модулирующими колебания по амплитуде. По существу, анализируя автокорреляционную функцию, мы следим за прохождением цугов колебаний разной амплитуды. Принимая это во внимание, автокорреляционные функции, рассчитанные по записям на разных удалениях от плотины, являются некоторыми индикаторами прохождения колебаний плотины в геологической среде. Результаты расчета по записям сейсмического шума вдоль профилей для правого и левого берегов представлены на рисунке 4.42, согласно которому, левый берег характеризуется меньшими коэффициентами корреляции, чем правый, где сигнал сильнее, т.е. закрепление плотины у левого борта лучше, чем у правого. Существенно, что на правом берегу при удалении от плотины коэффициенты корреляции уменьшаются. Это может быть связано с тем, что колебания в бортовых примыканиях плотины также являются частью собственных колебаний плотины, образуя своеобразную присоединенную массу (как мы видели на примере Гунибской ГЭС, см. раздел 4.4.2). А это значит, что истинная точка закрепления сооружения в правом борту лежит глубже в среде, чем визуальное бортовое примыкание. Это является косвенным признаком пониженных прочностных свойств в зоне сочленения плотины с правым берегом.



 1 – место размещения плотины, 2 – пункт замеров микросейсм с нумерацией
Рисунок 4.42 – Результат оценки автокорреляционных функций для правого (а) и левого (б) берегов, согласно схеме исследований, представленной на рисунке 4.37

Результаты многоканального анализа поверхностных волн. Для ряда профилей (PR13-21 правый берег и PR22-24 левый берег), представленных на рисунке 4.38, была выполнена инверсия дисперсионных кривых и были построены двумерные скоростные модели среды. Из рисунка 4.43 видно, что для правого берега (right side) до глубин 5 м в районе плотины выделяется низкоскоростной слой поперечных волн (скорости S-волн около 200 м/с), прослеживающийся вплоть до удалений на 180-200 м с последующим понижением до глубин 15 м. Для левого берега низкоскоростная область наблюдается лишь в приповерхностном слое. Скоростной разрез для правого берега характеризуется более мозаичной структурой, чем разрез для левого.



Рисунок 4.43 – Скоростные разрезы поперечных волн, полученные в результате инверсии дисперсионных кривых поверхностных волн для правого (а) и левого (б) берегов, схема профилей представлена на рисунке 4.38

Наличие зон с низкой скоростью поперечных волн около плотины для правого и левого берегов может быть обусловлено высокой влагонасыщенностью грунтов, связанной с проникновением воды из водохранилища. В целом отметим, что правый берег является более низкоскоростным.

По результатам инженерной сейсморазведки было выявлено ряд разрывных нарушений в ВЧР, показанных на рисунке 4.44 на который также схематично вынесены результаты предыдущих методов.



1 – зоны трещиноватости на профилях по данным малоглубинной сейсморазведки; 2 – абс. отм. рельефа; 3 – тектонические разломы; 4 – контур зоны техногенно измененных грунтов. Ослабленные зоны, выявленные по: 5 – методу микросейсмического зондирования; 6 – методу автокорреляционных функций; методу зондирования техногенными вибрациями грунтов (7) и плотины (8)

Рисунок 4.44 – Результаты обследования плотины и района ее размещения согласно комплексу сейсмических методов

Анализ результата комплекса сейсмических методов позволяет сказать следующее.

1. По данным зондирования техногенными вибрациями, метода микросейсмического зондирования (MM3), расчета автокорреляционных функций микросейсм, анализа разрезов по профилям инженерной сейсморазведки с интерпретацией объемных и поверхностных волн выявлены различия деформационных свойств геологической среды правого и левого берегов. На правом берегу, особенно в зоне сочленения плотины с бортовым примыканием, выделяются участки с пониженными скоростями поперечных и поверхностных волн. Повышенная трещиноватость пород правого берега в этой зоне по данным инженерно-геологических изысканий может приводить к тому, что часть горных

пород, соединенных с плотиной, вовлекается в процесс собственных колебаний объекта, на что указывают результаты анализа автокорреляционной функции микросейсм.

Сравнение с пространственным положением участков трещиноватости, выявленные также при геологических изысканиях для строительства, показывает, что ориентация зон по азимуту одинакова, но в среднем их линейные размеры на левом берегу меньше, чем на правом. Учитывая более глубокое размещение низкоскоростных пород для разреза правого берега, можно предположить, что трещины правого берега более крупные, проникают глубже, а их расположение и раскрытие более благоприятно для проникновения воды, особенно под давлением при подъеме уровня верхнего бьефа. Предполагаемая картина согласуется с результатами разных методов. При сбросе воды в водохранилище часть флюида может мигрировать как на поверхность с последующим выветриванием, так и вглубь. При длительной эксплуатации водохранилища данный процесс будет способствовать развитию выветривания и дальнейшему ослабления пород правого берега, т.е. к дальнейшей деградации несущей способности правого берега.

2. Для выявления особенностей работы конструкции плотины при разных деформационных свойствах основания на правом и левом берегу была составлена конечно-элементная расчетная модель плотины и выполнены расчеты ее деформирования под действием собственного веса и бокового пригруза воды в программе ЛИРА® (рисунок 4.45). В соответствии с нашими данными деформационные свойства грунтов основания на правом берегу заданы меньшими, чем на левом. Анализ картины напряжений в теле плотины в вертикальной плоскости показывает, что в верхней части конструкции вблизи правого берега наблюдается зона сжатия, а у левого – растяжения. Учитывая, что железобетонные конструкции хорошо работают при сжатии и существенно хуже при растяжении, можно предположить, что в зоне растяжение может наблюдаться деградация материала плотины, вплоть до микротрещин. Сравнение с данными сейсмического обследования (рисунок 4.40а), показывает, что зона растяжения приходится на участок аномальных свойств в теле плотины. Деградация материала и возможное наличие микротрещин отмечается в этой зоне и при визуальных обследования, описанных выше, причем по микротрещинам в материале плотины возможна фильтрация воды.

Отметим, что моделирование подтвердило также наше предположение о подвижности правого края плотины, причем именно в сторону верхнего бьефа (рисунок 4.45в), т.е. в той области береговых примыканий, где выделена ослабленная зона по результатам комплекса методов (рисунок 4.44).



Рисунок 4.45 – Результаты конечно-элементного моделирования состояния дамбы: а – модель; б – поля напряжений в вертикальной плоскости, в – перемещения в горизонтальной плоскости (вид сверху)

Таким образом, представлен комплекс сейсмических методов обследования ответственных объектов в районах с высоким уровнем техногенного шума на примере плотины Song Tranh-2. Комплекс методов основан на разностороннем анализе наблюдаемого сейсмического поля различными методами, позволяет оперативно получать данные о состоянии плотины, грунтов основания и дает основу для дальнейших мероприятий по обеспечению целостности ее состояния. Экспериментальные материалы являются ключевыми для понимания природы процессов деформирования тела плотины, которые связаны в первую очередь с состоянием основания. Полученные данные позволяют планировать мероприятия по реконструкции плотины и указывают на необходимость общего мониторинга геодинамического состояния района и детальных повторных обследований, которые целесообразно проводить по приведенной схеме.

Выводы

Экспериментальные материалы являются ключевым звеном для понимания природы процессов, вызывающих изменения состояния плотин и ГА, причем накопленные к настоящему времени сведения не дают основы для обеспечения современного уровня безопасности. Требуются новые исследования, выполнение которых возможно с

использованием современной аппаратурно-методической базы с подключением разработанных методик, основанных на анализе сейсмического поля. Это позволяет:

- получать сведения об изменении деформационных свойств материалов (строительных и горных пород) еще до проявления их визуально,

– выявлять аномальные участки в теле плотины путем наблюдения пространственного распределения полей вибраций от различных внешних источников (природных и техногенных), а также вести мониторинг собственных колебаний. Сопоставление характеристик аномальных участков с неоднородностями в грунтах основания и общей сейсмологической ситуации по региону позволяет выявить причину появления дефектов;

 получать реальную модель работы конструкций, в том числе ее сочленения с геологической средой;

– предложить дополнительную возможность обследования состояния объекта с помощью имеющихся тестовых сигналов (пуски ГА и местное землетрясение). Это возможно при условии реализации большого динамического диапазона и выполнения технических требований, описанных в гл. 2;

 предотвращать чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера на ранней стадии их возникновения.

5 Сейсмические способы обследования антропогенных объектов различного назначения

Задачи системы сейсмического мониторинга сооружений можно разделить на две категории: обеспечивающие безопасность уже существующего объекта и определяющие при проектировании выбор конструктивного решения. Научным результатом мониторинга являются новые представления о работе конструкций объекта совместно с окружающей средой (*Катценбах и др., 2003; Николаев и др., 2005; Таракановский и др., 2010*). На ряде уникальных объектов рассмотрим возможности сейсмического мониторинга для решения научных и прикладных задач.

5.1 Обследование состояния газокомпрессорной установки

Сейсмометрическое обследование газокомпрессорной установки (рисунок 5.1), расположенной в ЯНАО, Пуровский район, г. Тарко-Сале, проводилось с целью выявления причин возникновения повышенных вибраций. Используемая аппаратура: акселерометры СМG-5Т фирмы Guralp (Великобритания) с регистраторами GSR-24 (Швейцария). Количество комплектов – 4. В таблице 5.1 приведены нормативные параметры вибраций для данной установки.



Рисунок 5.1– Газокомпрессорная установка (фото и 3D-модель)

Измерения проводились на раме газокомпрессорной установки, на доступных оголовках свай, выходящих из фундамента, и на грунте. Характерный спектр мощности скоростей смещений при регистрации на раме представлен на рисунке 5.2.

, <u>1</u>	1 / 1		
Компоне	ЭНТ	Допустимые вибрации (дюйм/с)	Допустимые вибрации (мм/с)
Двигатель (на уровне верха рамы компрессора)		0.4	10.16
Рама компрессора (верх	рамы)	0.4	10.16
Рама компрессорной уст полка двутавра)	гановки (верхняя	0.15	3.81
Предохранительные кла клапана)	паны (по верху	0.8	20.32
Фундамент/сваи		0.1	2.54

Таблица 5.1 – Справочный материал по допустимой вибрации



 а – линейная шкала по оси ординат; б – логарифмическая шкала по оси ординат
Рисунок 5.2 – Характерный спектр мощности скоростей смещений при регистрации на раме газокомпрессорной установки и на грунте

Как правило, при построении спектров мощности используется логарифмическая шкала по оси ординат (рисунок 5.2б), но в данном случае для наглядности выявления частот наибольшей мощности лучше использовать линейную шкалу. Анализ рисунка 5.2 позволяет выделить преобладающие частоты работы установки (15.82 Гц – первая оборотная частота (949 об/мин), и 47.27 Гц), значения амплитуд которых анализировались во всех точках наблюдения.

В таблице 5.2 приведены значения расчетных скоростей смещений в различных точках наблюдения на раме установки на частоте 15.82 Гц, а на рисунке 5.3 показано их распределение (в мм/с) в пространстве. Места проводимых изменений на фундаменте газокомпрессорной установки и грунтах представлены на схеме рисунка 5.4, в таблице 5.3 - значения скоростей смещений (в мм/с) для первой оборотной частоты. Отметим, что на озерноаллювиальные, территории размещения установки развиты ледниковые аллювиальные и болотные отложения, местность относятся к зоне многолетнемерзлых пород мощностью 100-300 м, подзоне высокотемпературных мерзлых пород массивноостровного распространения 2013). Подобные (Положительное заключение...,

геологические особенности требуют организации вентилируемых фундаментов *(СП 25.13330.2012)*, что было указано в проекте для возведения газокомпрессорных установок, но не было реализовано.

			-			f=	=15.82 Гц
No morrier	V, мм/с			№ точки	V, мм/с		
л⁰ точки	X	Y	Z		Х	Y	Z
1	1.00	0.54	0.44	6	2.82	2.47	1.84
2	1.05	0.65	1.11	7	2.61	2.69	1.14
3	1.85	3.19	1.21	8	0.48	1.00	1.19
4	0.05	0.38	0.05	9	0.34	1.99	1.51
5	1.42	3.75	0.72	10	0.74	1.18	0.91

Таблица 5.2 – Расчетные значения скоростей смещений



Рисунок 5.3 – Смещения колебаний на f=15,8 Гц



красные кружки – точки наблюдений; желтый цвет – превышение допустимого значения виброскорости; розовый цвет – значение виброскорости близко к предельно допустимому; зеленый цвет – аномально высокое значение виброскорости

Рисунок 5.4 – Схема свайного поля газокомпрессорной установки с точками проводимых измерений

Таблица 5.3 – Значения физических величин для точек наблюдения, представленных на рисунке 5.4

			f = 15.82 Гц		
Мо сван	V, мм/с				
л⊻ сван	X	Y	Z		
32	0.78	3.26	0.67		
Α	1.65	5.55	0.75		
Б	2.13	2.81	0.48		
8	2.36	3.99	0.82		
7	2.53	3.38	0.81		
В	0.20	0.21	0.32		
10	0.70	2.45	0.74		
6	0.25	0.43	0.11		
Γ	0.80	2.81	0.33		
36	0.11	0.34	0.11		
37	0.38	0.25	0.13		
38	0.29	0.26	0.07		
Д	0.34	0.63	0.41		

Опираясь на справочный материал, приведенный в таблице 5.1 (*Отчет «Анализ вибраций…», 2010*), для компоненты фундамент/сваи допустимое значение вибраций для первой оборотной частоты составляет 2.54 мм/с. Приведенные значения скоростей смещений в таблице 5.3 показывают, что вибрации на фундаменте в ряде точек наблюдений превышают предельно допустимые значения в 1.3 раза (на 30 %). Отметим, что сигнал в некоторых точках при переходе в грунт не ослабевает (т. Д), а даже

увеличивается (точки А и Г), причем принимает значения большие или сравнимые, как на фундаменте. На рисунке 5.5 розовым цветом показаны аномальные области вибраций, а синим цветом – максимально сосредоточенная нагрузка на раму – место размещения двигателя.

Опираясь на экспериментальные результаты, можно сделать следующий вывод. Вероятно, именно факт отступления от проекта и создание фундамента газокомпрессорной установки без отсутствия вентиляции или специальных охлаждающих устройств привело к нарушению температурного режима многолетнемерзлых пород при работе установки, это, в свою очередь, привело к неравномерной просадке грунтов основания. Районы образования повышенных вибраций, по-видимому, связаны с неравномерной нагрузкой на саму раму (основная нагрузка сосредоточена в определенной области), что привело увеличению колебаний на противоположном конце фундамента и к ослаблению закрепления свай в грунте. В конечном итоге, общий крен конструкции привел к появлению недопустимых вибраций.

В качестве рекомендаций необходимо выполнить фундамент, указанный в проектной документации, и провести детальные инженерно-геологические изыскания места размещения установки.



Рисунок 5.5 – Аномальные значения вибраций
5.2 Верификация расчетной модели. Оценка сейсмических воздействий

Предыдущий пример – достаточно простой, где работу конструкций можно восстановить буквально «на пальцах». Обратимся к более сложным примерам.

Оценка состояния зданий и сооружений после сейсмических воздействий важна для обеспечения безопасности как проектируемых, так и существующих зданий, особенно исторических или реконструируемых. В существующей практике для объектов в сейсмоактивных районах проводится расчет с использованием спектрального метода или путем «приложения» воздействия в виде акселерограммы землетрясения (Уломов, 2009; Ордынская, 2010; Смирнов, Вахрина, 2011; Курбацкий, Баев, 2012 и др.). В зданиях со сложной объемно-пространственной композицией в несущих конструкциях возникают зоны концентрации напряжений, что приводит к необходимости усиления конструкций, т.е. корректировки проекта. Поэтому, до задания расчетной модели или для простых форм полезно иметь набор тестовых примеров для сходных сооружений, чтобы заранее предвидеть картину распределения напряжений.

Для существующей застройки задача оценки сейсмических воздействий требует, по меньшей мере, расчета собственных частот, а для уникальных зданий, в том числе исторических, – создания расчетной модели. Задача осложняется тем, что необходимо учитывать состояние исторического объекта, например деградацию стройматериалов стен и фундаментов (*Сейсмологические исследования..., 2011; Капустян и др., 2013*). На практике, например, при прогнозе воздействий, связанных с выполнением свайных полей вблизи зданий, полный объем расчетов не реализуется даже для памятников архитектуры. Как правило, достаточно получить оценку добавочных деформаций. Это можно сделать до начала забивки также методом регистрации слабых «тестовых» сейсмических сигналов.

Общим для оценки безопасности при сильных воздействиях на проектируемые и существующие здания является идея пересчета воздействий от наблюдаемых «тестовых» колебаний к таковым от сильных сейсмических событий на основании линейности системы и сходства диапазонов частот сигналов. Далее, в качестве примеров, рассмотрим оценку добавочных деформаций при выполнении свайных полей вблизи исторических зданий и оценку сейсмических воздействий на храм (*Kanycmян и др., 2015*).

Представленный подход основан на натурной регистрации слабых колебаний. Учитывая требования соответствия полос частот: основных собственных частот колебаний здания, тестовых воздействий и более сильных событий, например землетрясений, наиболее подходящими являются сейсмологические датчики, причем можно использовать

как велосиметры, так и акселерометры. Основные требования к регистрирующей аппаратуре приведены в главе 2.

Схема наблюдений в экспериментах примерно одна и та же: работы можно проводить с минимальным количеством датчиков – 2 шт., причем один из них располагается стационарно, а другой перемещается последовательно по выбранным точкам – на грунте или на конструкциях. Стационарный датчик, как правило, располагается на грунте. Длительность записи в каждой точке по нашему опыту не менее 30 мин, что позволяет выбрать «спокойный» участок (без помех), а также записать несколько цугов слабых «тестовых» сигналов, например, от метрополитена, от транспорта. Для регистрации колебаний от железнодорожных поездов проводится несколько включений или принимается бо́льшая длительность записи. Частота опроса сигнала не менее 100 Гц. Регистрация ведется по компонентам X, Y, Z, причем горизонтальные компоненты (X, Y) ориентированы по осям плана здания (для техногенных воздействий) либо, при прогнозировании воздействия землетрясения, как принято в сейсмологии, – по странам света.

Обработка данных сводится к просмотру записей, выбору нужных участков, например, цуга слабых воздействий, расчету спектров мощности, по которым определяется полоса частот тестового сигнала, при необходимости – полосовая фильтрация с удалением «ненужных» частотных составляющих. записи При сопоставлении спектров записей на грунте и на конструкциях может быть получен спектр реакции или определен набор собственных частот колебаний здания и значения амплитуд на этих частотах. Для получения оценочных значений для сильного воздействия можно воспользоваться величинами максимальной амплитуды на записях, как это сделано ниже. При необходимости задания в расчет акселерограммы принимается запись акселерометра, полученная на грунте около здания. Для проверки правильности модели или расчетов полученных результат сравнивается с параметрами реальной записи на конструкциях (готового здания или возводимого), как показано ниже.

5.2.1 Оценка добавочных деформаций при выполнении свайных полей вблизи исторических зданий

Пример иллюстрирует случай, когда полосы частот «пробного» сигнала и прогнозируемого воздействия совпадают. Работа выполнялась в связи с реконструкцией морского причала в бухте Благополучия на Соловках. Рядом с причалом расположено историческое здание – Преображенская гостиница (рисунок 5.6), находящаяся в плачевном

состоянии, но в будущем подлежащая восстановлению. Необходимо было оценить добавочные деформации, которые возникнут при выполнении свайного поля, для принятия решения о дополнительных мерах укрепления здания.





Рисунок 5.6 – Оценка воздействий на Преображенскую гостиницу (фото) по сейсмограммам: виброзадавливания свай (а), ударов кувалды (б)

В качестве слабого тестового сигнала использовались удары кувалдой на грунте около причала. Регистрация велась на грунте и на наиболее разрушенных блоках здания. Далее до выполнения работ по реконструкции Соловецкого причала в г. Архангельске проводилось изучение сигнала от установки, предлагаемой для будущих свайных работ. Регистрация виброзадавливания велась на грунте. Частотный состав свайных и ударных воздействий практически совпадает в диапазоне частот до 30 Гц, существенных для здания. Несмотря на предполагаемое сходство свойств грунтов для свайных оснований на Соловках и в Архангельске, было проведено уточнение, в Архангельске также были произведены удары кувалдой с их регистрацией. Отношения величин стандартного отклонения амплитуд записей от ударов кувалды на Соловецких островах и в Архангельске для X и Z компонент соответственно:

$$K_X = \frac{1.3 \cdot 10^{-4} \,\text{m/c}}{2 \cdot 10^{-5} \,\text{m/c}} \approx 6.5 \qquad \qquad K_Z = \frac{6.6 \cdot 10^{-5} \,\text{m/c}}{6 \cdot 10^{-5} \,\text{m/c}} \approx 1.1$$

Различия в амплитудах объясняются большей влажностью грунтов на Соловецких островах и проявляются в основном на горизонтальной компоненте. При согласованных полосах частот получены значения максимальных амплитуд для одноименных компонент X (или Z): A_0^k для ударов кувалды на грунте и A_i^k – в *i*-ой точке здания соответственно, A_0^c – на грунте при виброзадавливании. Оценка амплитуды на здании при виброзадавливании A_i^c для компоненты X (или Z) вычисляется по пропорции: $A_i^c = (A_0^c \cdot K_{X(Z)} \cdot A_i^k)/A_0^k$. При регистрации велосиметром добавочная деформация ($\Delta \varepsilon$) определяется из отношения колебательной скорости к скорости распространения (V): $\Delta \varepsilon = A_i^c/V$. В нашем случае, на здании при виброзадавливании свай колебательные скорости по горизонтали составили

1.3 мм/с, по вертикали – 0.4 мм/с (Антоновская и др., 2016). Используя оценки работы (Цейтлин, Смолий, 1981), полученные значения не представляют опасности. Наш прогноз оказался верным, т.к. забивка свай не привела к ухудшению состояния здания.

5.2.2 Оценка сейсмических воздействий на храм

В этом случае иллюстрируется ситуация, когда полосы частот тестового и прогнозируемого воздействий не полностью совпадают, так как записи землетрясений содержат низкие частоты, которые могут соответствовать первым формам колебаний зданий, но они отсутствуют в техногенном тестовом сигнале.

Работа выполнялась для оценки воздействия метрополитена на строящийся храм современной архитектуры в Сретенском монастыре в Москве. Это крупное железобетонное сооружение (площадь около 6000 м²), для которого существенно получение адекватной расчетной модели. Заметим, что по опыту мониторинга зданий расчетные и наблюденные поля деформаций конструкций хорошо согласуются (Вознюк и др. 2010), т.е. теоретические модели работы элементов адекватны реальности, при этом картина пространственного распределения нагрузок зависит от параметров закрепления модели в грунте. Взаимодействие фундаментов с грунтом – наиболее сложный вопрос при создании модели для расчетов из-за неоднородности грунтов и изменения их свойств во времени (например, при обводнении). Обычно верификация модели осуществляется после окончания строительства по совпадению наблюденных и расчетных собственных частот. Другая возможность – при использовании методики тестовых воздействий на ранней стадии строительства можно определить параметры закрепления модели в грунте (методом подбора). Это позволит своевременно уточнить конструктивные решения в верхних этажах.

Суть методики – проведение регистрации в процессе возведения здания техногенных широкополосных микросейсм с записью акселерограммы. Полученную акселерограмму задают как сейсмическую нагрузку в расчетную модель «усеченного» (состояние на момент обследования) здания и сравнивают с наблюденными величинами, тем самым проводят верификацию модели. Если это необходимо, то для выяснения реакции на сильное сейсмическое воздействие, например по (*Аптикаев, Эртелева, 2002*), проводят его масштабирование относительно техногенных микросейсм (по акселерограммам или спектрам).

Наблюдения велись во время строительства храма при выходе на первые надземные отметки (+6.100 м). Акселерограмма, принятая к расчету (одновременный проезд двух

поездов метро), и спектры мощности (рисунок 5.7) показывают, что основное воздействие метрополитена приходится на диапазон частот 10-20 Гц. Проверка расчетной модели проводилась путем сравнения результатов расчетов (перемещений) и экспериментальных замеров (пересчет ускорений в перемещения) для модели «усеченного» здания, соответствующего состоянию строительства на момент измерений.



Рисунок 5.7 – Проект храма (фото) и параметры сейсмических воздействий: а – акселерограммы по компонентам X, Y, Z; в – спектры мощности

Расчетная модель, предоставленная генпроектировщиком, была доработана нами с учетом специфики работы здания при динамических воздействиях. Модуль упругости сжатых элементов принят равным начальному модулю упругости бетона E_0 , учитывая, что распределение усилий между элементами конструкции зависит в основном от соотношения жесткостей этих элементов. Параметр затухания (коэффициент диссипации) принят $\xi = 0.1$, что соответствует рекомендуемому значению для железобетонных конструкций без предварительного напряжения арматуры. Длительность внешнего воздействия соответствовала длительности задаваемых записей. Усилия в конструкциях здания определялись с учетов высших собственных форм колебаний. При расчетах принят принцип суперпозиции, т.е. эффекты от динамических воздействий по направлению различных осей считаются независимыми (*Бирбраер, 1998*), суммарный эффект находится путем суммирования эффектов от частных воздействий. Вибрационные нагрузки прикладывались к расчетной модели вдоль основных осей расчетной схемы: X, Y, Z.

Для «усеченного» здания сравнение величин перемещений показывает очень хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений (таблица 5.4), что подтверждает правильность заданной модели, в том числе взаимодействие конструкции и грунтов основания, а также методики расчетов. Следует заметить, что частоты собственных колебаний «усеченного» здания выше, чем здания в целом, и совпадают с полосой частот тестового сигнала.

Отм., м	А _{эксп} , мм			А _{расч} , мм		
	Y	Х	Z	Y	Х	Z
-5.150	0.033	0.016	0.006	0.035	0.02	0.006
+6.100	0.177	0.101	0.010	0.149	0.08	0.008

Таблица 5.4 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений перемещений

Расчет модели здания в целом на тестовое вибрационное воздействие позволил получить значения инерционных сил и амплитуд колебаний здания (перемещений) по первым 500 формам (вплоть до значения собственных частот f=30 Гц). В расчете учтены все формы собственных колебаний, эффективная модальная масса которых превышает 1%; первые формы соответствуют частотам около 4 Гц. О характере перемещений, искажающих форму здания, можно судить, например, по рисунку 5.8, где показаны низшие изгибные собственные формы колебаний уже не «усеченного» здания.



Рисунок 5.8 – Низшие формы колебаний храма

Оценка на сильное сейсмическое воздействие для полученной модели проводилась с заданием акселерограмм, рассчитанных для некоторых районов России и предоставленных нам к.ф.-м.н. О.О. Эртелевой (ИФЗ РАН): слабосейсмичных (Санкт-Петербург) и сейсмоактивных – Северного и Западного Кавказа, Чукотки, Бурятии. Эта работа была сделана для нужд архитекторов в предположении использования проекта как типового для строительства в разных районах. Для сопоставления принимались значения ускорений не в широкой полосе частот, а до 30 Гц (исключая техногенное воздействие от работающего агрегата, пик на 25.78 Гц на рисунке 5.7в), что соответствует диапазону частот, рассмотренному в расчете.

Удивительно, что, несмотря на различие спектров тестового воздействия и землетрясений (спектры землетрясений приведены в (Уломов, 2009; Курбацкий, Баев, 2012)), получены одинаковые картины напряжений, но с разным «масштабным» коэффициентом. На рисунке 5.9 показаны суммарные напряжения, возникающие в

конструкциях, а на рисунке 5.10 – для разных форм колебаний для тестового воздействия и реального сейсмического.



Рисунок 5.9 – Суммарные поля напряжений для тестового сейсмического воздействия на храм



а – техногенное воздействие, б – действие землетрясения

Рисунок 5.10 – Поля напряжений для разных форм собственных колебаний храма

Анализ рисунков показывает, что наибольшие нормальные и касательные напряжения в несущих стенах храма возникают при расчете по первым низшим собственным формам колебаний (1-я, 2-я формы: 4–4.5 Гц). При увеличении собственной частоты поле напряжений изменяется: наибольшие значения напряжений регистрируются в несущих конструкциях центрального купола (14-я, 32-я формы: 8.7–10.2 Гц), затем в конструкциях малых куполов (35-я, 43-я, 73-я, 93-я формы: 10.9–15.7 Гц).

О «масштабировании» воздействия можно судить по значениям на палетках рисунка 5.10, распределение полей напряжений совпадает практически идеально. На рисунке 5.11 приведены с масштабированием значения максимальных главных растягивающих напряжений для разных форм колебаний при сравнении реального (использовалась акселерограмма землетрясения для г. Геленджика) и тестового воздействий. Оси графика подобраны так, чтобы значения напряжений на первых низкочастотных формах совпадали с учетом масштабирования: $\sigma_e = k \cdot \sigma_t$, где σ_e, σ_t – растягивающие напряжения для реального и тестового воздействий соответственно, k – коэффициент масштабирования.

Видно, что в случае разницы в спектральном составе пробного и реального воздействий оценка с использованием пробного сигнала даст завышенные значения для высших форм колебаний. Таким образом, для архитектурных форм навершия храма будут получены оценки напряжений «с запасом».



Рисунок 5.11 – Распределение напряжений в конструкциях по частотам собственных колебаний для «пробного» (полые кружки) и реального (черные кружки) сейсмических воздействий

Основные выводы, полученные при расчетах:

 максимальные напряжения как при вибрационном, так и при сейсмическом воздействиях возникают при расчете по низшим поступательным формам колебаний; – при вибрационном воздействии напряжения, сопоставимые с максимальными, возникают также при расчетах по высшим формам, но только в других частях конструкции. При расчете на сейсмическое воздействие учет высших форм колебаний слабо меняет суммарную картину напряжений, поэтому при выборе архитектурного образа здания храма можно избежать создания детальной компьютерной модели и проводить оценку для сильно упрощенной конструкции.

5.3 Оценка уровня вибраций, создаваемых железнодорожным транспортом

Рост грузопотоков (в том числе увеличение грузоподъемности и скорости движения транспорта) обуславливает необходимость получения количественных оценок влияния транспортной вибрации на сохранность зданий и, особенно, архитектурных памятников. Действующие в настоящее время (СП 42.13330.2011) регламентирует допустимые уровни вибрации определенного частотного состава. Для оценки опасности вибрации для конкретного сооружения эти условия не являются достаточными, т.к. практически не учитывается состояние сооружения. Важно оценить создаваемые дополнительные напряжения в теле объекта и соотнести их с расчетным сопротивлением материала конструкции или несущей способностью ее элементов. Любой вид транспорта является источником колебаний, которые через грунтовую среду передаются на расположенные вблизи магистралей сооружения, вызывая их вибрацию, приводя к изменению, как технического состояния зданий, так и к ухудшению комфортности пребывания в них людей. По действиям на конструкции колебания, создаваемые транспортом, можно рассматривать как одну из разновидностей сейсмических воздействий, для которых разработаны методы оценки влияния: спектральный подход или расчет с использованием акселерограмм.

По мере удаления на различное расстояние от транспортного полотна колебания затухают неравномерно, т.к. представлены совокупностью сейсмических волн разных типов – объемных и поверхностных, ослабевающих по разным законам в зависимости от расстояния от источника, уровень колебаний в точке наблюдения определяется интерференцией волн в разных точках. Кроме того, существенны свойства системы дорожное полотно–грунт–фундамент–надземная конструкция. Известно, что наблюдаемый уровень техногенных вибраций определяется всей совокупностью факторов, которые могут привести к усилению или снижению отклика на вибрационные воздействия. К факторам такого рода относятся: физико-механические свойства и строение грунтов, наличие подземных вод, состояние фундамента, его сочленения со зданием и пр.

Существующие в настоящее время теоретические методы оценки преобразования внешних воздействий при переходе их из грунта в тело сооружения требуют задания ряда коэффициентов, описывающих физико-механические свойства самого сооружения, зоны контакта сооружения с грунтами основания и пр. Учитывая, что существует достаточно много моделей задания грунтов, которые трудно выбрать *a priori*, одним из реальных путей получения достоверной информации является выполнение специальных экспериментальных сейсмометрических исследований с применением современных методов обработки.

Ниже приводится описание эксперимента по оценке состояния сооружения и выявления опасности существующих воздействий. Эксперимент (в отличие от многих проводившихся ранее) описан детально для того, чтобы, во-первых, показать логику обработки и как комплексируются разные методы (малоглубинная сейсморазведка и оценка состояния грунтов и сооружения по микросейсмам). Во-вторых, демонстрируется, как подбирается схема наблюдений (расстановка точек), и, наконец, как проводится сравнение с расчетной моделью. При этом имели в виду описание, дающее возможность проведения подобных обследований, учитывая актуальность проблемы воздействия железнодорожного транспорта на сооружения.

Описание эксперимента. Такие специальные исследования проводились нами в 2010 г. по просьбе и содействии настоятеля Спасо-Прилуцкого Димитриева монастыря в г. Вологде. Объектом исследования является южное прясло, находящееся в аварийном состоянии (рисунок 5.12).



Рисунок 5.12 – Внешний вид южного прясла Спасо-Прилуцкого монастыря, г. Вологда

Стена «оторвалась» от башен (система крупных трещин), имеет сильный крен в сторону внутреннего двора. В настоящее время считается, что стену поддерживают 5 контрфорсов, они также находятся в неудовлетворительном состоянии. Вдоль западной стены протекает р. Вологда, а на расстоянии порядка 170 м от прясла расположено полотно Северной железной дороги (рисунок 5.13).



Рисунок 5.13 – Фото района проведения работ по материалам http://maps.google.ru/

Помимо практического значения для реставрации памятника архитектуры данные работы имели и фундаментальный аспект, связанный с проработкой методики сейсмометрических обследований зданий (*Сейсмологические исследования..., 2011*), учитывая простоту формы сооружения (пластина). Практической целью работ было выяснить причины разрушения стены монастыря и оценить вклад вибрации от транспорта в ухудшение ее состояния.

Инженерно-сейсмометрические обследования представляют собой комплекс методик, включающий: наблюдение динамики обследуемого объекта (в том числе построение основных форм собственных колебаний); обследование грунтов оснований; задание расчетной схемы по результатам инструментальных сейсмических наблюдений, запись акселерограмм воздействий и отклика сооружения, расчет отклика модели на вибровоздействие.

Наблюдение динамики сооружения необходимо для оценки параметров движения точек объекта при собственных колебаниях. Их определение является отображением состояния сооружения и необходимо для создания расчетной модели, максимально приближенной к действительности. Получив такую модель, можно оценить вклад тех или иных воздействий на сооружение, в нашем случае – вибраций от железнодорожного транспорта, а также разрабатывать необходимые реставрационные мероприятия (*Пашкин, 2005*).

При задании расчетной модели закладываются следующие параметры: геометрия сооружения, его конструктивная схема, связь с другими объектами (в нашем случае с башнями монастыря), способы закрепления в грунте, деформационные модули и коэффициент поперечной деформации грунта, прочностные характеристики стройматериалов, основные трещины и дефекты, статические нагрузки, действующие на сооружение. Необходимо также учесть, что каждому из параметров свойственны пространственные вариации, т.к. характеристики материала могут меняться вдоль стены (например, разная степень выветренности). При этом каждое изменение свойств отображается на собственных колебаниях (формах колебаний). Например, ослабление закреплений стены в грунте или «раскрепление» между башнями существенно снижает значения частот соответствующих форм собственных колебаний. Закрепление стены у башен дает нулевые перемещения в этих точках, а раскрепление – ненулевые (см. пример в гл. 4).

Сейсмометрические наблюдения собственных колебаний и воздействий проводились:

- на прясле на доступном верхнем уровне (галерее), включая заход в башни, в нижних бойницах;

- на грунте – вдоль стены и пройден профиль от железной дороги к стене и далее по территории монастыря.

Применялось два типа сейсмометров: велосиметры CM-3KB со станцией KБC (Юдахин и др., 2007) и акселерометры CMG-5T Guralp с регистратором GSR-24 GeoSIG (подробнее об параметрах см. гл. 2). Наблюдения велись по компонентам X, Y, Z, ориентация: горизонтальных компонент – вдоль и вкрест стены. Длина прясла составляет 140 м, датчики ставились на галерее практически у каждой бойницы, т.е. с шагом 3.5 м. На полученных записях микросейсм интерпретировались следующие сигналы:

- собственные колебания стены;

- записи проходящих поездов (пассажирских, товарных).

Рассмотрим результаты анализа собственных колебаний стены. На рисунке 5.14 приведены спектры мощности колебаний, записанных велосиметрами в разных точках прясла, приведен интервал низких частот, содержащих первые формы собственных колебаний стены. Показана ситуация для горизонтальной компоненты вкрест стены – в направлении наиболее «выразительных» собственных колебаний. Видно множество максимумов (пиков), тем не менее, можно отметить, что ряд пиков встречается постоянно, что позволяет нам отнести их к собственным колебаниям. Это пики на частотах 0.58, 1.75 и 3.5 Гц.



Рисунок 5.14 – Спектры мощности колебаний, записанных велосиметрами в разных точках прясла, компонента – горизонтальная вкрест стены

В соответствии с методикой анализа собственных колебаний (Юдахин и др., 2007; Басакина, 2011) в каждой точке наблюдений для каждой из частот были определены амплитуды и фазы колебаний и построены экспериментальные профили форм (рисунок 5.15). Эти кривые являются исходными для выбора модели из совокупности расчетных моделей, наиболее полно соответствующей эксперименту.



Линия с маркерами – профиль формы по точкам наблюдений, сплошная – полиноминальное сглаживание. Перемещения показаны в зависимости от номера бойницы, 0 – башня у реки

Рисунок 5.15 – Экспериментальные формы собственных колебаний на частотах 0.58, 1.75 и 3.5 Гц

Анализ рисунка 5.15 показывает следующее:

- наблюдаются ненулевые перемещения в точках у башни (35 бойница), причем наибольшие – для частоты 3.5 Гц, т.е. не для первых форм. Это говорит о том, что «раскрепление» прясла от башни не доходит до низа стены, что также соответствует видимым трещинам;

 - формы колебаний имеют более изрезанный вид в левой части графика (бойницы 20-35), чем в правой (1-19), что говорит о большей целостности правой части прясла;

- на первой из наблюдаемой форм (зеленая кривая) отчетливо просматриваются ворота, заложенные в настоящее время кирпичом (по признаку возможности совершать большие перемещения, т.е. ослабления конструкции).

Отмеченные особенности инструментальных сейсмометрических наблюдений хорошо согласуются с визуальным анализом. Приведенные кривые на рисунке 5.15 являются ключевыми при подборе расчетной модели.

5.3.1 Воздействие вибраций от железнодорожного транспорта

Для оценки воздействия вибраций от железнодорожного транспорта измерения производилось на прясле и на грунте по двум типам профилей: 1) ж/д насыпь – у прясла снаружи – за пряслом внутри монастыря и 2) ж/д насыпь – у прясла снаружи – в нижней части стены – в верхней части стены у бойниц. Эти наблюдения выполнялись акселерометрами для получения реальной акселерограммы воздействия, которая затем задавалась в расчетную модель для определения дополнительных нагрузок от динамических воздействий транспорта.

Анализ воздействий необходимо начать с выявления природы сейсмических волн, возбуждаемых поездом, что, во-первых, можно определить по траектории движения частиц. Второй признак типа волны – закон ослабления амплитуды с расстоянием от источника. Анализ проводился в трех плоскостях: горизонтальной вкрест и вдоль луча (источник – точка наблюдений) для собственных частот колебаний стены 1.75 и 3.5 Гц. На рисунке 5.16 представлена траектория вдоль луча как самая показательная в данном случае для определения природы волн.



Рисунок 5.16 – Траектории движения частиц грунта (в единицах g = 9.8 м/c²) в плоскости луча от поезда для точек наблюдения вдоль профиля, перпендикулярного ж/д насыпи, частотная фильтрация 1.75 и 3.5 Гц

Видно следующее:

 вблизи источника наблюдается смесь объемных и поверхностных волн, при удалении от него – в основном поверхностные волны, что подтверждается малым ослаблением амплитуды с расстоянием;

- на частоте 1.75 Гц возбуждение вибраций, по-видимому, осуществляется горизонтальными воздействиями поезда на насыпь, на 3.5 Гц – вертикальными.

Перейдем к анализу спектров мощности. На рисунке 5.17 представлены спектры мощности микросейсм при воздействии поезда и в спокойное время, полученные при наблюдениях в верхней части стены в ключевых бойницах (крайних: $N \ge 2$ и $N \ge 35$, в середине $N \ge 20$ и на ¹/₄ от края – $N \ge 11$). Полоса частот, характерная для сигналов проходящего поезда по наблюдениям у насыпи, – от 3 до 10 Гц. Основное усиление колебаний в этом диапазоне происходит в направлении поперек стены, возрастание мощности колебаний примерно в 1000 раз (амплитуды в 30 раз). В других направлениях возрастание мощности отмечается примерно в 100 раз (амплитуды в 10 раз). Следует отметить, что полученные значения являются очень малыми для сейсмических воздействий, тем не менее, судить о влиянии вибраций от поезда можно, но только после расчета добавочных напряжений при задании акселерограммы сигнала от поезда в расчетную модель.

Для получения спектров реакции стены на воздействие был проведен следующий эксперимент. Акселерометры одновременно вели запись по профилю в следующих точках: I – под ж/д насыпью, II – на грунте у стены, III – на стене в нижней части над точкой II, IV – на стене в верхней части над точкой II. Было пройдено два подобных профиля, один у края стены (бойница №2), другой в середине стены. Результаты представлены на рисунке 5.18, где показаны отношения спектров мощности для точек: IV/II, III/II.

Анализ кривых показывает следующее:

- основные приращения наблюдаются вверху стены, что закономерно, т.к. именно в этом месте конструкция наиболее слабо закреплена;

- колебания в диапазоне от 3 до 10 Гц характерны для верха стены в направлении поперек нее, спектры реакции представлены резонансными пиками, что подтверждает усиление колебаний на собственных формах. Это же согласуется с увеличением реакции в середине стены по сравнению с краем;

- усиление колебаний в верхней части стены на высоких частотах связано с «разбитым» верхом – наличием серии трещин, не доходящих до низа стены;

- для каждой из частотных составляющих приращения амплитуды при воздействии вибраций от поезда не велики – не более 4 раз;

- частоты с 1.5 до 2.5 Гц – диапазон собственных частот стены в целом по грубой оценке по спектру реакции.



Рисунок 5.17 – Спектры мощности колебаний стены в разных бойницах по трем компонентам при прохождения товарного поезда (а) и фоновый уровень микросейсм (б)



1 – край стены (бойница № 2), 2 – середина стены

Рисунок 5.18 – Спектры мощности реакции стены на воздействия прохождения поезда, направления колебаний: X – вдоль стены; Y –поперек стены; Z – вертикальные

Рассмотрим более подробно, как реагируют участки стены на вибрации от поезда (рисунок 5.19). Видно, что спектры существенно различаются для правой и левой частей прясла, причем как в верхней части, так и в нижней. В верхней части прясла нарастание амплитуд в соответствующем диапазоне частот указывает на большую «разбитость» (больше трещин и частоты ниже, т.е. трещины длиннее) левой части стены, в правой части трещины мельче (выше частоты полученных пиков амплитуд). Это же отражено в отношениях спектров, записанных вверху к нижним – в правой части верх и низ стены работают по-разному уже с частоты 2 Гц. Аналогично на рисунке 5.20 рассмотрены воздействия вибрации от поезда на башни. Видно, что левая башня существенно больше «оторвана» от стены, чем правая.



Рисунок 5.19 – Спектры мощности колебаний стены при прохождении поезда (а) и отношение спектров (б), полученных вверху к таковым внизу, регистрация одновременно в бойницах 15 и 26 – в верхних (толстая линия) и в нижних на стене, акселерометры, компонента поперек стены



Рисунок 5.20 – Спектры мощности колебаний стены при прохождении поезда, регистрация одновременно в верхней (толстая линия) и в нижней частях башни, акселерометры, компонента поперек стены

На рисунке 5.21 показаны пространственные распределения ускорений в нижней части стены при воздействии микросейсм и вибрации от поезда для одной из собственных частот (1.75 Гц). В этом случае усиление вибрации при прохождении поезда (относительно уровня микросейсм) получается больше – примерно в 200 раз, тем не менее, абсолютные величины воздействий крайне малые – до 10⁻³g. Амплитуды воздействий вдоль стены в горизонтальной плоскости изменяются мало, поэтому в данном случае в расчете можно принять одинаковые жесткости закрепления в грунте. Ускорения по вертикали (и, следовательно, перемещения) у левой башни примерно в два раза больше, чем у правой, что совпадает с предыдущим результатом и указывает на «оторванность» башни от прясла.



Рисунок 5.21 – Ускорения в нижней части стены при воздействии микросейсм (пунктир) и вибрации от поезда (сплошная), компоненты регистрации: вертикальная и горизонтальные вдоль и поперек стены, частота 1.75 Гц

На рисунке 5.22 приведена типичная акселерограмма, которая закладывалась в динамический расчет.



Рисунок 5.22 – Акселерограмма вибрации от поезда по компонентам: вверху – вдоль стены; в середине – поперек стены; внизу – вертикальная

Приведенные результаты инструментальных наблюдений дают важные параметры для создания расчетной модели прясла, отражающей его реальное состояние, а также определяют собственные частоты и формы колебаний, что существенно для сопоставления результатов расчета с экспериментом и уточнения модели.

Обследование грунтового массива проводилось с применением инженерной (малоглубинной) сейсморазведки методом преломленных волн (МПВ), результаты которой использовались в расчетной модели при задании условий закрепления объекта в грунте. На рисунке 5.23а разными цветами показано расположение профилей вдоль стены, на рисунке 5.23б – в качестве примера один из сейсмических разрезов (*Kanycmян и др., 2012*).

Первая преломляющая граница (средняя скорость от 400 до 500 м/с) отделяет техногенный слой и пески, она имеет ярко выраженный наклон к реке. Возможно, это общее направление понижения к реке более древнего рельефа.



Рисунок 5.23 – Схема расположения сейсморазведочных профилей у подножия стены (а) и сводный сейсмический разрез по профилям ПР 1, 2, 3

В целях изучения грунтов были отработаны ряд профилей максимально близко к стене: ПР 4, ПР 6 с шагом сейсмоприемников 2.5 м и ПР 5, ПР 7 и ПР 8 с шагом 1м (рисунок 5.23). По результатам МПВ были построены поля пространственного распределения параметров грунтов основания, необходимых для задания закрепления прясла в грунте в расчетной модели (рисунок 5.24). В качестве таких параметров используются скорости продольных (V_P) и поперечных волн (V_S) для деформируемого

слоя. Величины V_s были получены путем выделения на записях поверхностных волн, определение их кажущейся скорости (V_R) осуществлялось путем использования известного $V_R = 0.9 V_S$. соотношения Отметим, что скорости V_{S} низкие характеризуют легкодеформируемый грунт. Последнее отражается в увеличении амплитуд колебаний сооружения при сейсмических (вибрационных) воздействиях, например от железной дороги. Увеличение мощности низкоскоростных слоев дает возможность развития большей осадки сооружения. На рисунке 5.24 представлены пространственные распределения скоростей вблизи стены (горизонтальная полоса – прясло в плане), на рисунке 5.25 – вариации скорости V_P по профилям вдоль стены: внутри монастыря и снаружи.



а – *V_S*/*V_P*, б – скорости продольных волн (*V_P*), в – скорости поперечных волн (*V_S*) Рисунок 5.24 – Планы прясла с результатами пространственного распределения параметров верхнего слоя основания стены



Рисунок 5.25 – Вариации скорости V_P по профилям вдоль стены: внутри монастыря и снаружи

Их анализ показывает следующее:

– мощность верхнего низкоскоростного слоя увеличивается в сторону реки, что отражает геологию речной долины. Прослеживаются даже погребенные береговые террасы. В центральной части сооружения, в том числе под заложенными кирпичом воротами, мощность слоя также большая, чем по бокам, что, возможно, является следом «продавленной» дороги, над которой «нарос» низкоскоростной культурный слой (обломки стройматериалов при закладке ворот). Отметим, что на ПР 1, 2, 3 граничная скорость на обсуждаемом участке также несколько больше, чем по краям, средние скорости V_p с внутренней стороны стены несколько ниже, чем с внешней, хотя в отдельных точках – закономерность обратная. Средние скорости V_S для внутренней стороны прясла указывают на более слабые грунты, причем наиболее явно в левой части и вблизи погребенной дороги. Отчетливо прослеживаются уплотнения грунта, созданные контрфорсами, причем как внутри стены (в местах их расположения), так и снаружи, что указывает на значительную по глубине область влияния этих элементов сооружения. Заметим, что слева контрфорсы разобраны, поэтому грунт частично «восстановился», что отражено в соотношениях кривых.

Таким образом, с внутренней стороны прясла грунты более «слабые» по деформационным свойствам и возможно ожидать большей осадки внутренней стороны стены.

Анализ сейсмометрических данных и вскрытие шурфа позволили предположить литологию слоев – это водонасыщенные пески и суглинки, техногенные отложения с песками и супесями, песчано-обломочные грунты. По отношениям V_S/V_P значения 0.3-0.6 соответствуют супесям и суглинкам (голубой цвет на рисунке 5.24), 0.55-0.68 – пескам с галечником (зелено-оранжевый цвет на рисунке 5.24). Эта оценка литологии также использована для задания упругих свойств основания прясла.

Наиболее полно методика расчета деформационно-прочностных характеристик грунтов описана в (*Аникин и др., 1985*). Приведем различные эмпирические соотношения для разных грунтов:

 $E_{\text{деф}} = 0.01425 V_P + 0.1985 V_S - 27 -$ пески неводонасыщенные,

 $E_{\text{деф}} = 0.15175 V_S - 18.9 -$ - пески водонасыщенные,

 $E_{ge\phi} = 0.0736V_P + 0.0562V_S - 3.7 - суглинки четвертичные неводонасыщенные,$

 $E_{ge\phi} = 0.154V_S - 12$ –песчано-глинистые грунты неводонасыщенные.

Учитывая, что деформируемая толща под стеной может быть достаточно велика (до 10 м) по данным МПВ были рассчитаны средние скорости (*V_{P cp}*) (*Капустян и др., 2012*).

Интервал изменения значений $E_{ge\varphi} = 6 - 22$ МПа, среднее значение 17 МПа. При учете большей мощности деформируемого слоя получаем $E_{ge\varphi} = 59 - 80$ МПа. Воспользовавшись эмпирическими соотношениями между $E_{ge\varphi}$ и $E_{de\varphi}$ (динамическим модулем упругости (рисунок 5.26)), получаем возможные вариации $E_{de\varphi} = 20 - 1000$ МПа.



Рисунок 5.26 – Эмпирические соотношения между и Е_д (Аникин и др., 1985)

5.3.2 Сопоставление расчетных данных и натурных наблюдений

Соотношение статического E_0 и динамического E_d модулей Юнга $E_d = 0.8E_0$ дает для статических расчетов значения $E_0 = 25 - 1250$ МПа. Приведенная оценка показывает, что даже небольшое изменение скоростных свойств грунтов за счет обводнения существенно – оно может изменить их несущую способность до двух порядков.

Подбор расчетной модели осуществлялся в два этапа: сначала по материалам обмеров задавалась упрощенная модель (см. рисунок 5.23а), а затем более детальная (Капустян и др., 2012). Принятые в расчете характеристики каменной кладки по (СП 15.13330.2012):

 $R_u = 0.9 \text{ МПа} -$ расчетное сопротивление кладки сжатию (кирпич марки 50, раствор марки 25) (таблица 2 из *(СП 15.13330.2012)*);

 $R_t = 0.16$ МПа — расчетное сопротивление кладки растяжению при изгибе по перевязанному сечению (раствор марки 25) (таблица 11 из (СП 15.13330.2012));

α = 1000 – упругая характеристика кладки (таблица 16 (СП 15.13330.2012));

 $E_0 = R_u \cdot \alpha = 900 \text{ МПа} -$ начальный модуль упругости кладки;

 $E = 0.8 \cdot E_0 = 720 \text{ M}\Pi a$ — модуль упругости кладки при определении периода собственных колебаний;

 $E = 0.5 \cdot E_0 = 450 \text{ M}\Pi a$ – модуль упругости при расчете кладки по прочности;

G = 0.4 · E₀ = 360 МПа – модуль сдвига кладки (п. 6.28 *(СП 15.13330.2012)*);

 $\nu_{\pi} = 2.2 -$ коэффициент ползучести кладки (п. 6423, СНиП II-22-81*)

v = 0.22 – коэффициент поперечной деформации кладки.

Подбор характеристик основания в модели уместно рассмотреть совместно с решением статической задачи, которая дает возможность оценить поля напряжений в теле объекта. Основной нагрузкой является вес сооружения. Мерой «правильности» подбора расчетной модели является совпадение значений собственных частот – расчетных и наблюденных, а также профилей перемещений точек тела при его собственных колебаниях. Расчет динамической задачи с приложением вибрационных воздействий показывает, какие величины напряжений добавляют эти воздействия к уже имеющимся статическим. Суммарное напряжение сравнивается с расчетным сопротивлением материала, тем самым судят о «вредности» вибраций.

Статическая задача. Современное состояние прясла – наклон, изгиб в средней части и пр., показывает, что изначально конструкция претерпевала изменения вследствие статических нагрузок. По опыту строительства (Пашкин, 2005), наиболее вероятной причиной современного состояния прясла является ослабление фундамента или нарушение (либо изначальный недоучет) свойств грунтов основания. Принимая во внимание то, что для площадки характерны слабые грунты, мы попробовали смоделировать ситуацию, приведшую прясло в современное состояние.

Моделирование велось для упрощенной модели прясла. На рисунке 5.27 показан разрез стены и поля перемещений, полученные в результате расчета. Для моделирования ситуации с внешней стороны стены задавались относительно плотные грунты (коэффициенты постели $C_1=200 \text{ т/m}^2$ (коэффициент сжатия), $C_2=1000 \text{ т/m}^2$ (коэффициент сдвига)), а внутри – очень слабые (например, обводненные), ($C_1=1 \text{ т/m}^2$, $C_2=5 \text{ т/m}^2$). Решение статической задачи дает правдоподобную картину: стена наклонилась в «нужном» направлении, причем на достаточно большой градус (2°). По существу, мы задали очень слабые грунты внутри стены для того, чтобы не рассматривать процесс ее деформирования во времени и «набор» современного состояния наклона. Кроме того, картина тангенциальных напряжений (нижняя часть рисунка) объясняет возникновение трещин вблизи башен, наблюдаемых сейчас.

Рассмотрим решение статической задачи для более детальной модели с учетом башен. Была принята единая модель грунта для всего основания со следующими

характеристиками: осредненный модуль упругости E = 17 МПа и коэффициент Пуассона грунта $\nu = 0.32$.

В качестве основания в расчетной модели было выбрано упругое основание по Пастернаку характеризующееся двумя коэффициентами постели (податливость основания по вертикали и по горизонтали):



 $C_2 = 2 \cdot C_1 = 5.23 \text{ MIIa.}$

а – поперечный разрез по пряслу, картина перемещений; б – пространственное распределение тангенциальных напряжений в прясле, ответственных за появление трещин, наблюдаемых в настоящее время

Рисунок 5.27 – Решение статической задачи перемещения стены при ослабленном грунте,

В результате расчетов была получена картина деформации основания (рисунок 5.28). На рисунке 5.29 приведена пространственная картина деформации основания в районе башни.





Рисунок 5.29 – Деформация основания в районе башни, статическая задача

Анализ решения статической задачи показывает, что причину возникновения трещин в стене следует искать в недостаточной несущей способности фундаментов сооружения. В записях из архива, предоставленных научными сотрудниками монастыря, есть упоминание «...во время ледохода напор льда был так велик, что повредило кирпичную кладку на фундаментах...». Таким образом, при разливе реки уровень воды может значительно подниматься, что непредсказуемо скажется на физико-механических характеристиках грунтов и приведет к ослаблению фундамента. Из исторических записей также следует, что башни были возведены через 10-15 лет после окончания строительства стены. Это могло привести к дополнительной осадке фундаментов части стены примыкающей к башне и образованию трещин в наиболее ослабленных проемами местах (рисунок 5.30) *(Сотников и др., 1986)*. Такие кулисообразные трещины отчетливо видны на стене.



Рисунок 5.30 – Схема силового воздействия строящегося здания (I) на уже существующее (II), расположенное в пределах воронки оседания. А-Г – зоны повреждения конструкции *(Сотников и др., 1986)*

Статический расчет дает также формы собственных колебаний сооружения, частоты которых приведены в таблице 5.5 для моделей: упрощенной (У), детальной (Д) и

детальной с раскреплениями (трещинами у башен – Д1). Видно, что значительная детализация модели не на много меняет значения собственных частот, более важным является ослабление закрепления.

Динамическая задача – воздействия железнодорожного транспорта. Рассмотрим деформацию стены от динамического воздействия при задании реальной акселерограммы от поезда на расчетную модель. Наиболее опасное направление динамического воздействия - вдоль оси Y (поперек стены).

			I, I Ц
N формы	Модель У	Модель Д	Модель Д1
1	1.53	1.43	1.26
2	1.93	1.63	1.40
3	2.04	1.76	1.50
4	2.12	2.13	1.84
5	2.38	2.43	2.03
6	2.7	2.81	2.37
7	3.25	3.19	2.70
8	3.34	3.60	3.07
9	4.03	3.66	3.45
10	4.9	3.68	3.63
11		3.74	3.64
12		3.95	3.69

Таблица 5.5 – Частоты форм собственных колебаний

Расчет показывает, что динамический отклик системы распределяется следующим образом:

48.37% – составляющая по оси У от первой формы;

24.13% – составляющая по оси У от третьей формы;

6.04% – составляющая по оси Z от третьей формы.

На рисунке 5.31 приведены перемещения, полученные в расчете, максимальное в центре прясла – 10 мкм (10^{-5} м). Нагрузки, полученные в результате динамического расчета по трехкомпонентной акселерограмме от воздействия проходящего поезда оказались достаточно малыми. Порядок усилий, полученных в стене, составляет $10^{-2}..10^{-3}$ H/м², что значительно меньше нагрузок от собственного веса конструкций и временных нагрузок. Из этого следует, что вибрации от поезда не могут быть основной причиной разрушения прясла.



Рисунок 5.31 – Картина перемещений при воздействии вибраций от поезда (только динамика без учета собственного веса)

Таким образом, на конкретном примере показано применение комплекса инженерносейсмометрических методик для оценки состояния зданий и сооружений, позволившего получить важные практические результаты о состоянии и путях реконструкции южного прясла Свято-Прилуцкого монастыря, г. Вологда:

1. Конструкции прясла находятся в неудовлетворительном состоянии и требуют ремонта и реставрации.

2. Основная причина развития трещин, отклонения от вертикали и изменения линейности по горизонтали связана с взаимодействием стены с грунтами основания. В связи с этим требуется обследование фундамента и его укрепление. Рекомендуется также провести мероприятия по укреплению грунтов основания комплексом технологических (искусственное усиление) и гидрогеологических (частичное обводнение) работ.

3. Работы по укреплению фундаментов необходимо сочетать с вычинкой стен, максимально возможным устранением невертикальности, возможно – с раскрытием арочного проезда в центральной части стены.

4. Вибрации от железнодорожного транспорта в данном случае не оказывают воздействия, способного приводить к разрушению прясла даже на длительном интервале времени воздействия. Установка виброзащиты не рекомендуется.

5.4 Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании

Изучение состояния и закономерностей работы несущих конструкций ответственных сооружений, к которым относятся высотные здания, а также использование полученных знаний в практике проектирования является залогом надежности и безопасности их

функционирования. Всякая новация в строительстве при применении на практике проходит ряд стадий, в том числе исследования на моделях, образцах, натурных стендах вплоть до постановки специальных наблюдений при возведении и эксплуатации. Ярким примером последнего являются эксперименты проф. И.Л. Корчинского при строительстве высотных домов в Москве в 1950-х гг. (Корчинский, 1953) – изучались ветровые воздействия на здания и было доказано, что в основном несущие конструкции массивных сооружений «работают» на сдвиг. Обширными исследованиями динамических испытаний зданий занимались зарубежные коллеги, начиная с 30-х годов прошлого века, отметим лишь некоторые работы: (Carder, 1936; Hudson, 1970 и др.). Использование природных и техногенных (вибрационных) микросейсм для оценки периода собственных колебаний зданий различных конструкций отмечается в работах коллектива исследователей под руководством Трифунаса М.Д. (Trifunac, 1970; 1972; Ivanovic et al., 2000 и др.).

Более, чем 10-летний опыт высотного строительства с сопровождением его мониторингом, в том числе и сейсмометрическим, привел к некоторой корректировке нормативов, но осталось главное – требование проведения мониторинга ответственных сооружений на всех этапах: от проектирования до сноса (Федеральный закон РФ от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»). Если выполнение мониторинга для строящегося и существующего здания допускает различные приемы, его цели понятны, то задачи мониторинга на стадии проектирования не столь очевидны. Несомненно, что проект мониторинга, определяющий подбор и размещение датчиков в здании, является составной частью комплекта проектной документации, но есть и другие задачи.

Приведем задач мониторинга, которые примеры могут решаться при проектировании. Их можно разделить на две категории: практические – обеспечивающие безопасность здания, и научно-исследовательские – определяющие выбор того или иного конструктивного решения. К последним, в качестве примера, относятся работы по моделированию поведения грунтов основания по их характеристикам, полученным при инженерно-геологических изысканиях на площадке строительства. Накапливаемые при этом научные представления, особенно подтвержденные геотехническим мониторингом (Катиенбах и др., 2003; Николаев и др., 2005; Таракановский и др., 2010), обогащают строительную науку. Круг проблем большой, остановимся на возможностях менее распространенного вида мониторинга – сейсмометрического, для решения практических и научно-исследовательских задач.

Оценка вибровоздействий на проектируемое здание.

Высотное строительство в основном ведется в крупных городах, для которых характерны специфические динамические воздействия, из них рассмотрим два: влияние на проектируемое здание колебаний соседних сооружений и воздействие вибраций от транспорта, в частности метрополитена неглубокого заложения. Учет влияния поясним экспериментальными примерами из практики проектирования.

Влияние на здание колебаний соседних сооружений проиллюстрирован в главе 1 на примере оценки воздействий Ленинградского моста через канал им. Москвы на здание, проектируемое на расстоянии примерно 200 м от него (рисунок 1.4).

Влияние на проектируемое высотное здание метрополитена неглубокого заложения рассмотрим на примере высотного корпуса, планируемого к строительству в 100 м от ветки метро вблизи станции Мякинино в Москве. На площадке предполагаемого строительства проведены сейсмометрические наблюдения с той же аппаратурой, что в предыдущем примере. На рисунке 5.32 представлены характерные акселерограммы, полученные на грунте площадки для случая двух идущих навстречу поездов, регистрация по трем компонентам (вертикальной и горизонтальным – вдоль линии метро (X) и вкрест ее (Y)).



Рисунок 5.32 – Типичная акселерограмма для двух встречных поездов легкого метро, запись на грунте по компонентам: вертикальной (Z) и горизонтальным – вдоль линии метро (X) и вкрест нее (Y)

Для оценки воздействий рассчитывался спектр записи и затем пересчитывался в скорости смещений (V) (рисунок 5.33) с учетом того, что добавочные напряжения σ -V. Сравнение со спектром для участков записи вне прохождения поезда показывает, что подъем спектра на частотах около 7 Гц и в полосе частот от 20 до 50 Гц с максимумами примерно на 40 Гц соответствует частотам вибраций от метро. Отметим, что пик на частоте примерно 7 Гц (точнее f=6.67 Гц) определяется диаметром колеса вагона (d=860

мм) и средней скоростью v=65 км/ч (18 м/с): время оборота колеса $T = \pi \cdot d/\vartheta \approx 0.15c$ пересчитывается в частоту f=1/T≈6.67 Гц. Этот пик является типичным для вибраций при движении метропоездов, его следует учитывать для сооружений с близкими по значениям собственными частотами, т. е. для небольших строений или легких конструкций, сооружаемых вблизи линий легкого метро.



Рисунок 5.33 – Типичный амплитудный спектр скоростей смещений вибровоздействий на грунте от прохождения поезда метро и без него

В соответствии с *(ГОСТ Р 52892–2007)* можно оценить допустимые скорости, создаваемые вибрациями. Для жилых зданий в полосе частот от 20 до 50 Гц они не должны превышать 15 мм/с, для 7 Гц – 5 мм/с, т. е. согласно рисунку 5.33 в нашем случае имеется почти 10-кратный «запас».

Данный расчет сделан без учета возможного резонанса с собственными колебаниями здания. Можно решить задачу, как и в предыдущем примере, путем расчета компьютерной модели здания по реальной акселерограмме, что и было сделано с вычислением параметров для первых 100 форм собственных колебаний (особенность программы «Лира», большее количество задать сложно). Анализ результатов модального анализа показывает, что полученные значения собственных частот колебаний здания очень близки: при определении 100 форм колебаний удается «дойти» только до 3 Гц, что ниже доминирующих частот вибровоздействий. Данная особенность расчета связана со сложностью пространственной модели, определяющей появление многочисленных форм крутильных колебаний.

Пример этого расчета выявляет ряд проблем, из них обсудим две. Прежде всего, учитывая, что основные частоты вибраций достаточно высоки, разумно сразу перейти от здания в целом к его элементам. В контексте данной задачи рассмотрено влияние

вибрационных нагрузок на ограждающие конструкции. Была задана модель типовой несущей конструкции, поддерживающей элементы архитектурного оформления здания (карниза). Конструкция составлена из прокатных стальных уголков и крепится к железобетонным несущим конструкциям здания при помощи механических анкеров. Собственные частоты колебаний такой конструкции близки к частотам внешнего вибрационного воздействия, что обуславливает возникновение в ее элементах дополнительных усилий. На рисунке 5.34 показана форма колебаний, соответствующая собственной частоте f=51 Гц.



Рисунок 5.34 – Вибровоздействия от метро на проектируемое здание – картина вынужденных колебаний конструкции карниза (f = 51 Гц)

Максимальные усилия, возникающие в элементах данной конструкции при действии вибрации, составили около 12% усилия, возникающего при действии эксплуатационных нагрузок, что может оказать влияние на ее несущую способность. Рассмотренная конструкция является лишь иллюстрацией, показывающей влияние вибрационных нагрузок на ограждающие конструкции, применяющиеся в современных зданиях. Результаты оценочного расчета показали, что после уточнения архитектурных и конструктивных решений здания следует провести детальный анализ влияния вибрационных воздействий на применяемые ограждающие конструкции.

Вернемся к малому шагу по частотам, полученному при расчете форм колебаний. Опыт сейсмометрического обследования сооружений простых форм убедительно показывает, что близкие по значениям частоты собственных колебаний, как линейных, так и крутильных, при натурных наблюдениях представлены в спектрах единым пиком с «промежуточной» частотой (*Басакина, 2011; Сейсмологические исследования..., 2011, Кариstian et al., 2013)*, что является отражением реально существующих нелинейных связей конструктивных элементов. Наиболее яркие проявления этого эффекта отмечаются

в исторических зданиях и памятниках архитектуры (*Сейсмологические исследования...,* 2011), но наблюдаются также и для железобетонных арочных плотин.

Для учета данного эффекта при оценке вибровоздействий от метро применен следующий прием. Была составлена эквивалентная упрощенная расчетная схема, учитывающая распределение жесткостей и масс по высоте здания. В результате расчета упрощенной модели здания на вибрационное воздействие, заданное в виде акселерограмм, получены инерционные силы и амплитуды колебаний здания по всем формам (вплоть до значения собственных частот f=90 Гц). На рисунке 5.35 показаны низшие формы колебаний здания: две изгибные и одна крутильная. Максимальные значения амплитуд перемещений, скоростей и ускорений колебаний составили соответственно 0.45 мм; 1.3 мм/с и 36 мм/с², что качественно совпадает с более грубой оценкой по (*ГОСТ P 52892–2007*). Отметим, что были не только уточнены параметры возможных колебаний здания, но также получена оценка дополнительных усилий в несущих конструкциях: значение продольного усилия в колоннах нижнего этажа от вибрационной нагрузки составляет 0.5 т, т. е. менее 0.5% расчетного усилия от вертикальных нагрузок.

Таким образом, при составлении сочетаний нагрузок в ходе расчета колонн по прочности и устойчивости, вибрационное воздействие можно не учитывать.



Рисунок 5.35 – Вибровоздействия от метро на проектируемое здание – низшие формы собственных колебаний эквивалентной модели здания

5.4.1 Мониторинг состояния конструкций

Пример иллюстрирует чувствительность системы сейсмического мониторинга. Подбор эквивалентной модели для расчета с учетом возможного изменения характеристик материалов конструкций уместно проиллюстрировать примером долговременного (13 лет) мониторинга состояния конструкций, начатого ОАО «ЦНИИЭП жилища» в 2000-х гг. при проектировании 44-этажного здания «Эдельвейс» в Москве. Одним из вопросов было выяснение реальных изменений во времени состояния здания с железобетонным каркасом.

Учитывая, что к началу эксперимента нормативных документов по мониторингу еще не существовало, наиболее простым способом, практически не затрагивающим интересы заказчика, явилось оборудование на 44-м техническом этаже станции мониторинга с трехкомпонентной сейсмометрической регистрацией. На рисунке 5.36 приведены результаты мониторинга собственных частот f_1 и f_2 (по разным осям плана) колебаний здания. Регистрация велась раз в 10 дней по 2-3 часа с 2004 г. по настоящее время.

Видно, что за 12 лет значения собственных частот уменьшилось примерно на 20%, причем тенденция спада кривых трендов напоминает закономерности, получаемые на образцах для ползучести бетона. Этот вопрос требует специального исследования, здесь отметим, что кривые трендов стремятся к одному значению частоты, что характерно для эффекта согласования частот при наличии нелинейности в системе. По-видимому, наблюдается комбинация ползучести материала и проявления нелинейных связей в конструкциях. После сглаживания и снятия тренда на кривых выделяются годовые и сезонные вариации значений собственных частот.



a — долговременный мониторинг собственных частот высотного здания «Эдельвейс» в Москве; δ — кривые временного хода частот; в — те же кривые после фильтрации и снятия тренда

Рисунок 5.36 – Результаты мониторинга собственных частот f₁ и f₂ (по разным осям плана) колебаний здания

Обратим внимание на «высокочастотные» выбросы кривых. Корреляция временного хода частот с данными по замерам атмосферного давления у фасада здания, проводимая микробарографом, показала, что выбросы обусловлены вариацией ветровых нагрузок. Это дает оценку изменения собственной частоты колебаний до 0.005 Гц при изменениях атмосферного давления в 500 Па (0.001 Гц при 100 Па или примерно 1 мм рт. ст.). Эти величины доступны для наблюдений при сейсмомониторинге, т.е., используя вариации собственных частот колебаний сооружения, можно выявить столь малые изменения напряженно-деформированного состояния здания, которые сопоставимы с пульсационными ветровыми нагрузками.

Практическими результатами изучения этого явления является уточнение современных представлений в области сопротивления высотных зданий ветровым и сейсмическим воздействиям, а также совершенствование конструктивных решений будущих высотных зданий.

5.5 Экспресс-метод обследования жилых зданий в зоне разрушительных землетрясений

Статистика показывает, что ежегодно на Земле происходит минимум одно разрушительное землетрясение (выше 8 баллов), около 18 землетрясений от 7-8 баллов и 120 – 6-7 баллов (*Самые мощные землетрясения*). Для сейсмоактивных территорий определение состояния целостности конструкций зданий и возможность их «пережить» очередное землетрясение (или мощный афтершок) становится первоочередной задачей. В России обследование состояния инженерных сооружений осуществляется в соответствии с (*СП 13-102-2003*). Методы обследования сооружений делятся на разрушающие (вскрытие конструкций, стен, и т.д.) и неразрушающие (визуальное наблюдение, инструментальное обследование, маяки и др.). Наиболее достоверную информацию о состоянии сооружения дает использование инструментальных методов в сочетании с компьютерным моделированием сооружений, включая грунты оснований, при статических и/или динамических нагрузках. Среди инструментальных методов, на наш взгляд, наиболее информативными являются микросейсмические методики, позволяющие получить целостную картину состояния здания (см. гл. 2).

В градостроительных планах городов присутствуют типовые застройки и историкоархитектурные памятники. В первую очередь для типовой жилой застройки наиболее рациональным является вариант экспресс-обследования состояния сооружения с выделением наиболее ослабленных мест, если такие имеются, в которых в дальнейшем

концентрируются основные инструментальные исследования. Привлечение расчетных моделей упрощает проводимые исследования, т.к. позволяет оценить (смоделировать) вклад тех или иных будущих воздействий на сооружение, а также разработать необходимые реставрационные мероприятия с учетом нанесенных повреждений.

Рассмотрим пример, который иллюстрирует возможности методики для зданий, пострадавших от землетрясения или техногенной аварии, когда необходимо оперативно оценить состояние сооружения. В Архангельске в 2004 г. взрывом газа практически полностью была разрушена крайняя секция панельного дома (рисунок 5.37). В тот момент наша методика находилась в стадии разработки, поэтому был выполнен минимальный объем наблюдений, тем не менее, оказавшийся достаточным для принятия решения о восстановлении здания.

Сейсмометрические измерения проводились на грунте вблизи аварийного дома, на первом и девятом этажах соседней секции, длительность регистрации один час.



Рисунок 5.37 – Исследования разрушенного здания в г. Архангельске: фото аварийного дома (слева) и спектры мощности записей на 9 этаже в разрушенном (СК) и целом (ОК) зданиях (справа)

Для сравнительного анализа было обследовано целое здание этой же строительной типовой серии, стоящее рядом на сходных грунтах. Сравнение спектров мощности обоих зданий (рисунок 5.37) показывает практически полное совпадение кривых для горизонтальных компонент, в том числе наличие пика на частоте 1.9 Гц, соответствующего одной из первых собственных частот колебаний сооружения. Отображением аварии является отсутствие этого пика на вертикальной компоненте (Z) у разрушенного здания. Консультации со специалистами, проектирующими панельные здания, позволило объяснить отмеченную особенность спектров – в пострадавшем доме нарушены вертикальные связи в строительных конструкциях из-за разрушения опирания перекрытий на стены. Результатом обследования является вывод о нарушении целостности основных несущих конструкций.

Выводы

Представленные сейсмические способы позволяют объединить в единый комплекс подходы прикладной геофизики и строительных наук при равнозначности каждого из них, при этом получить важные практические результаты. Применение набора различных сейсмических способов для диагностики состояния сооружений показывает возможности их использования в разнообразных ситуациях, в том числе при массовом обследовании зданий в городах после сильных землетрясений.

Сейсмические подходы не требуют применения крупногабаритной техники, просты в исполнении, позволяют получать информацию о состоянии и пригодности к эксплуатации сооружения. Кроме того, дают возможность создать модель сооружения, наиболее полно отражающей его реальное состояние и могут быть основой для оценки эффективности восстановительных мероприятий.
6 Перспективы развития систем сейсмического мониторинга на Крайнем Севере

Освоение природных ресурсов Арктики стимулировало развитие транспортного обеспечения территорий, например, наращивание грузоперевозок по Северному морскому пути (СМП), а также проект по созданию железнодорожной магистрали «Северный широтный ход» (СШХ), соединяющей Северную железную дорогу со Свердловской (рисунок 6.1).



Рисунок 6.1 – Фрагмент карты Западного арктического сектора РФ с нанесением ряда ответственных объектов, по (http://www.mrts.ru/en/index.php?option=com content&limitstart=10http://www.mrts.ru/en/inde

(<u>nttp://www.mrts.ru/en/index.php?option=com_content&limitstart=10nttp://www.mrts.ru/en/index.php?option=com_content&limitstart=10</u>)

При выполнении работ мощная инфраструктура строится на территории, где на большей части развиты вечномерзлые грунты различных типов и к настоящему времени изучены недостаточно полно, особенно учитывая потепление климата. В частности, выявлена деградация вечномерзлых грунтов, связанная с повышением среднегодовых отрицательных температур грунтов и оттаиванием их с поверхности. Подобные явления приводят к развитию деформаций зданий и сооружений, а также к необходимости поддержания в грунтах проектных температурных условий (подмораживания) в течение

всего срока эксплуатации объектов (Строительство на вечной мерзлоте..., 2018). Низкое качество инженерно-геологических изысканий, отступление от проектной документации и прочие обстоятельства могут приводить к аварийным ситуациям, как было показано в примере п. 5.1 гл. 5, другие возможные природные опасные процессы отмечены в главе 1. В перспективе задача обеспечения безопасности соответствующих объектов с созданием современных систем мониторинга, нацеленных на выявление изменений в грунтах их оснований, становится все более актуальной. Рассмотрим современные возможности реализации систем сейсмического мониторинга, нацеленных на данную проблематику.

6.1 Сейсмический мониторинг Северного морского пути

Безопасность прохода судов по СМП является проблемой, на которую нацелен комплекс наблюдений: метеорологических и гидрологических. Сейсмологические данные пока не входят в эту систему, хотя региональные коровые землетрясения и льдотрясения могут существенно изменять пространственную динамику ледового покрова.

Отметим увеличение сейсмической изученности в районе прохождения СМП после открытия пункта сейсмических наблюдений на архипелаге Северная Земля в ноябре 2016 г. (гл. 3). За первые 5 месяцев работы было зарегистрировано свыше 150 региональных землетрясений и семь локальных событий. Большинство событий произошло в районе архипелага, что говорит о современной сейсмической активности этого региона.

Особенностью арктических морей является их длительное замерзание и образование обширного ледяного покрова. К примеру, для Карского моря льдообразование начинается в сентябре-ноябре в зависимости от района, за зиму лед достигает в среднем 0.5–1.5 м толщины, таяние ледяного покрова в его юго-западной части начинается в конце мая (*Труды ААНИИ*).

На рисунке 6.2 приведена карта ледовой обстановки за 19-21 ноября 2017 г. по материалам (http://www.nsra.ru/ru/navigatsionnaya_i_gidrometinformatsiya/icecharts.html), на которую нанесены сейсмические события по данным каталога лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН, а на рисунке 6.3 – карта ледовой обстановки на 27 мая 2017 с графиками вариаций толщины за 2013-2017 ΓΓ. по материалам льда (http://polarportal.dk/en/sea-ice-and-icebergs/sea-ice-thickness-and-volume/). Анализ карт показывает, что максимальная толщина льда образуется в районе архипелага Северная Земля и в частности в проливе Вилькицкого, через который проходит транспортная

артерия СМП. Существенно, что данный район характеризуется современной сейсмичностью.



1 – Нилас (0-10 см), 2 – Молодой лед (10-30 см), 3 – Однолетний лед (30-200 см), 4 – Старый лед, 5 – Припой, 6 – Чисто, 7 – землетрясения, 8 – техногенные события, 9 – Северный морской путь

Рисунок 6.2 – Анализ ледовой обстановки по данным ИСЗ на 19-21 ноября 2017 по материалам (<u>http://www.nsra.ru/ru/navigatsionnaya i gidrometinformatsiya/icecharts.html</u>) с нанесенными данными о сейсмичности по данным каталога лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН



Рисунок 6.3 – Ледовая обстановка на 27 мая 2017 г. в циркумполярной зоне с графиками вариации толщины льда за 2013-2017 гг. по материалам http://polarportal.dk/en/sea-ice-and-icebergs/sea-ice-thickness-and-volume/

Сейсмические события могут приводить к непредсказуемому по гидро-метеоданным изменению торосистости льда, что может затруднять судоходство. Конечно, это требует более детальных исследований с подключением данных космической съемки. Кроме необходимости изменения маршрута судов, кили ледяных торосов могут создавать статические и динамические нагрузки на подводные трубопроводы, вызывая их повреждения (*Наумов, 2010; Миронов, Порубаев, 2012*).

Одним из путей решения в вопросах безопасности СМП является развертывание арктической сейсмической сети РФ путем установки новых сейсмопунктов в дополнении к имеющимся станциям (см. гл. 3). Существенно, что станции принадлежат разным ведомствам, оснащены аппаратурой разного типа, нет единого центра сбора данных и обработки арктических событий. Все это затрудняет создание единого представления о сейсмичности Арктики. В то же время, в арктической зоне на территории зарубежных стран работает в десятки раз больше станций и сейсмических групп (см. гл. 3). Дополнительное открытие сейсмических пунктов в районе прохождения СМП позволит существенно повысить чувствительность сети, пример для Западного арктического сектора РФ приведен в гл. 3. При этом целесообразно комплексировать мониторинг ледовой обстановки, выполняемый Росгидрометом, с мониторингом сейсмичности.

6.2 Сейсмический мониторинг линий железнодорожных магистрали

Создание постоянно действующей системы сейсмического мониторинга, нацеленной на решения нескольких задач (сейсмичность территории, состояние пути и подстилающих грунтов), необходимо и вдоль линий железнодорожных магистралей, в частности, вдоль Северного широтного хода (СШХ). Заметим, что в ряде стран, например, такие как Франция, Швейцария, Япония, Южная Корея и др., вдоль скоростных линий установлены железнодорожных магистралей системы раннего оповещения 0 землетрясениях (Shimamura, Yamamura, 2008; Yamamoto, Tomori, 2011; Honam High-Speed Railway; TGV High-Speed Railway). При регистрации Р-волны, характеристики которой превышают заданные параметры, происходит автоматическое отключение электропитания от электрических подстанций железнодорожного полотна, в следствие чего, происходит экстренная остановка поезда (за секунды до прихода разрушительных S-волн). Предотвращаются аварии и сохраняются жизни людей.

Ожидать бурной сейсмической активности в районах линий железнодорожных магистралей на севере России не приходится, но тут существуют опасные процессы совершенного другого характера. На территории РФ в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов эксплуатируется около 5 000 км линий железных дорог (включая БАМ и большую часть Транссиба) и планируется строительство новых – например, СШХ. Ветки железнодорожного полотна проложены по территориям, которым присущи участки вечной мерзлоты, заболоченности, распространения карстовых процессов, что проявляется в виде повышенной деформативности пути из-за развития этих процессов.

Согласно (*Оценочный доклад..., 2009*), по результатам мониторинга состояния полотна Северной железной дороги в период 1970-2001 г. на участке Сейда-Воркута величина ежегодной термокарстовой просадки грунта составляла:

- в середине 1970х гг. 10-15 см,

- в 1995 г. – увеличилась до 50 см,

- с 1998 по 2001 г. – общая протяженность участков под полотном железной дороги увеличилась в полтора раза, с 10 км до 15 км.

Данным изменениям способствовало увеличение среднегодовой температуры воздуха в среднем на 3-4°С.

В последние годы в России и за рубежом получили развитие полевые методы исследования грунтов, прежде всего, это статическое и динамическое зондирование *(Aunus, 2002)*. Отметим, что при всей эффективности этих методов они не могут выполнять постоянный (непрерывный) контроль земляного полотна и обнаруживать явление на ранней стадии его развития, эти методы лишь разовая диагностика на опасных участках. С другой стороны, разработаны технические решения по стабилизации земляного полотна. Например, на участках льдистых многолетнемерзлых грунтов предлагается устанавливать солнцеосадкозащитные навесы (рисунок 6.4а) или выполнять превентивное оттаивание сильно льдистых массивов с одновременным замещением их непросадочной грунтовой массой.



а – солнцеосадкозащитные навесы на откосах насыпи Цинхай-Тибетской ж/д (Кондратьев, 2008); Тибетское плато, Китай (Оценочный доклад..., 2009): б – термостабилизация насыпи ж/д полотна при помощи охлаждающих термосифонов, в – вентиляционные каналы в дорожной насыпи

Рисунок 6.4 – Примеры технического решения стабилизации земляного полотна железной дороги

Подобные навесы установлены в местах распространения льдистых многолетнемерзлых грунтов вдоль Амуро-Якутской магистрали (Кондратьев, 2008), уникальная система термоизоляции действует на железной дороге «Обская – Бованенково – Карская» (Мегапроект «Ямал»). Или другое решение – установка парожидкостных термосифонов (Кондратьев, 2009; Оценочный доклад..., 2009), работающих по принципу теплового насоса, «закачивая холод» из атмосферного воздуха в верхний слой вечной мерзлоты и понижая ее температуру в холодный период года (рисунок 6.46). Это позволяет

понизить среднегодовую температуры на 1–5°С без каких-либо затрат энергии. Применяют также и устройство вентиляционных каналов в насыпях линейных сооружений (рисунок 6.4в).

Как показала практика (*Кондратьев, 2009*), радиус действия термосифона не превышает 1.5-2 м и, в конечном итоге, может приводить к деформациям земляного полотна. Тем не менее, существующие проблемы по обеспечению устойчивости земляного полотна, обнаружению на ранней стадии развития опасных геологических процессов и прочего подтверждают факт недостаточной проработки данного вопроса, необходимости новых технических решений и постоянно действующей системы мониторинга, в том числе адаптированной для условий Крайнего Севера.

Информативность изучения верхней части разреза (ВЧР) земной коры может быть существенно увеличена с помощью применения новых геофизических технологий, использующих приемы комплексирования различных сейсмических методов, как это было рассмотрено в п. 4.7 главы 4. Основными преимуществами таких методов являются отсутствие необходимости в специальных источниках зондирующего сигнала, относительная простота и доступность реализации. Понятие «микросейсмические наблюдения» объединяет целый набор технологий, основанных на анализе волн разного генезиса и типов (сейсмическая эмиссия, техногенные сигналы, поверхностные волны и пр.). Нами прорабатываются подходы обследования ВЧР путем выделения «полезного» сигнала из техногенных микросейсм (вибрации от поезда) (Антоновская, Афонин и др., 2017). Существенно, что для получения принципиально разнородной информации о среде зарегистрированное волновое поле может параллельно обрабатываться различными способами, опирающимися на разные «полезные» составляющие микросейсм. Задание расчетной модели и рассмотрение различных ситуаций при изменении физических характеристик подстилающих грунтов и воздействий от поездов позволит наилучшим образом осуществлять эксплуатацию ж/д магистралей, планировать реконструкцию и капитальный ремонт объектов инфраструктуры.

Открывается возможность, исходя из состояния грунтов и деформирования пути, регулировать скорости прохождения состава на неблагоприятных участках, оценивать максимальной допустимой массы состава и его длины, а также проверять качество выполненных ремонтных работ по укреплению земляного полотна.

В условиях современного состояния аппаратурной и информационной инфраструктуры рассмотрим возможность систем сейсмического мониторинга в решении задач выявления на ранней стадии негативных природно-техногенных изменений в

состоянии железнодорожного (ж/д) полотна и подстилающих грунтах. На рисунке 6.5 приведена, разработанная нами, схема предлагаемой системы сейсмического мониторинга.



1 – сейсмический датчик; 2 – система электропитания, передачи и хранения сейсмических данных; 3 – система сбора сейсмических данных (приема-передачи и хранения), установленная внутри поезда; 4 – мачта сотовой связи; 5 – Центр данных РЖД (РЖД ЦД); 6 – автоматическая обработка данных; 7 – Сейсмологический центр данных (СЦД); 8 – региональная сейсмическая сеть, действующая в регионе

Рисунок 6.5 – Схема системы сейсмического мониторинга железнодорожного земляного полотна

Вдоль линий ж/д полотна устанавливаются пункты сейсмических наблюдений (1), оснащенные системами электропитания, хранения и передачи данных (2). Шаг расстановки зависит от сложности инженерно-геологических условий района, предполагается сгущение пунктов в более сложных районах (карст, заболоченность, тектонический разлом и пр.), вплоть до установки сейсмических минигрупп. В одиночных пунктах устанавливаются акселерометры (как более технологичные), для сейсмических групп используются велосиметры или акселерометры (в зависимости от особенностей наблюдаемого опасного явления). Использование аналоговых датчиков и расположенного рядом блока цифровой регистрации и передачи данных (как в системе мониторинга Чиркейской ГЭС) позволяет при необходимости достаточно просто заменять датчик, исходя из решаемой задачи.

При прохождении поезда (пассажирского или грузового), оснащенного системой сбора сейсмических данных (3), происходит последовательный сбор данных со всех станций с использованием радиоканала в качестве беспроводной связи. Далее, при вхождении в зону покрытия сотовой связи (или используя каналы связи РЖД), данные передаются на сервер в центр данных РЖД (5), где происходит их архивация и автоматическая обработка с целью выявления развития опасных процессов, определение уровня опасности участка (6). Возможно, в блоке регистрации следует заложить алгоритм выделения сигналов, характеризующих опасные процессы (предобработка) с соответствующим реагированием.

Эффективность технологии достигается сопоставлением натурных наблюдений с базой данных изменения параметров при наборе ожидаемых опасных процессов, преимущественно в грунтах. Данными предполагается обмениваться с региональным сейсмологическим центром данных (7) по сети Internet, который является центральным банком сейсмических данных в регионе (8).

При выявлении развития неблагоприятной ситуации на участке устанавливается локальная система мониторинга, нацеленная на получение дополнительной информации о состоянии природно-техногенной системы. Например, можно дополнительно использовать радиоволновой метод, позволяющий следить за изменением размеров и положением неоднородности и пр. (Задериголова, Лопатин, 2014).

Помимо решения задач мониторинга земляного полотна, в результате мы имеем линейные профиля сейсмических сетей, это дополнительные сейсмические станции, данные которых необходимо подключать для задач сейсмического мониторинга Крайнего Севера. Прежде всего, полученные таким образом сейсмологические данные дают представление о региональном сейсмическом режиме. Кроме того, возможно использование линейных систем для изучения глубинного строения, источниками могут быть достаточно сильные землетрясения, карьерные взрывы, работа мощных вибраторов и пр. Таким образом, происходит увязка различных систем сейсмического мониторинга. Важно не только обнаружить аномальную зону и контролировать ее состояние, но и выявить причины ее формирования и/или развития.

Перспективным направлением может быть создание систем сейсмического мониторинга на разных типах ответственных объектов, размещенных на Крайнем Севере, например, сейсмический мониторинг нефтегазовых установок, фундаментов ракетных установок и пр. При этом необходима «увязка» всех систем сейсмического мониторинга,

т.е. создание комплексной системы. Подобный прием, но меньшего масштаба, был реализован нами при создании системы сейсмического мониторинга Чиркейской ГЭС (см. главы 2 и 4), что подтверждает реальность осуществления предложенной идеи.

Разумеется, предложенная система мониторинга земляного полотна ж/д магистралей это некий задел на будущее, требующая проработки многих технических и методических вопросов. Тем не менее, научно-исследовательские работы в этом направлении уже начаты, например, реализуется проект РФФИ, проводимый совместно с ОАО «Российские железные дороги» по теме «Разработка технологии сейсмического мониторинга и экспресс-оценка состояния земляного полотна железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера и Сибири», № 17-20-02119 (руководитель Антоновская Г.Н.).

6.3 Исследование на натурных моделях геологических сред

Рассмотрим возможность использования антропогенных объектов для изучения геодинамических процессов. Идея рассмотрения арочных плотин в качестве гигантских деформометров, «встроенных» в геологическую среду, как дополнительный прибор для мониторинга региональной геодинамической обстановки предложена в (Антоновская и др., 2015).

Помимо этой идеи искусственные сооружения могут быть использованы для натурного моделирования геодинамических процессов в блоковой среде. Это позволяет приблизить размеры модели к реальной геологической среде, что заполняет пробел между исследованием на образцах и естественными объектами.

Роль срединно-океанических хребтов (COX) как источников геодинамических процессов на платформах постоянно обсуждается (Skordas et al., 1991; Юдахин и др., 2003; Грачев и др., 2008 и др.), но вопросы переработки напряжений блоковой геологической средой в сейсмическое излучение изучены еще недостаточно. Сформировалось представление о том, что возмущения, создаваемые в зонах COX, передаются так называемыми деформационными волнами, являющихся триггером сейсмичности (Юдахин и др., 2003; Быков, 2005). Блоки земной коры участвуют в передаче возмущения, а сейсмические события маркируют его распространение (Skordas et al., 1991; Юдахин и др., 2003). При математическом (Perfettini, Avouac, 2004) или лабораторном (Memodы и системы..., 2009) моделировании движения блоков основным недостатком является то, что нет надежных критериев соответствия моделей и реальности. При анализе экспериментальных данных (в основном сейсмологических сетей) определяют параметры

распространения воздействий – характерные времена, дальнодействие, связь их с особенностями COX и пр. (*Skordas et al., 1991; Грачев и др., 2008*).

В общей картине не хватает существенных деталей – механизмов переработки внешних для блоковой среды нагрузок в ее сейсмическое излучение. Ниже предлагается воспользоваться натурным моделированием – воссозданием процессов на средах иного масштабного уровня, но принадлежащим к той же иерархической системе, что и геологическая среда. Целью исследования было выявление возможных механизмов деформирования блоков, соотношения напряжений, сбрасываемых в сейсмическое излучение, и воздействующих на среду с разными ритмами. Первоочередная задача – доказательство пригодности предлагаемых натурных моделей.

Хорошие натурные модели блоковой среды были найдены нами на Соловецких о-вах – это валунные дамбы – морская (рисунок 6.6) и озерная. Дамбы возведены в XIX в. из моренных валунов диаметром ~1 м с песчано-галечно-глиняным заполнением, сооружения не реконструировались, т.е. связи между блоками – «устоявшиеся» во времени. Районы необитаемы, т.е. антропогенный фактор минимален.



а – вид со спутника, б – фото дамбы

Рисунок 6.6 – Вид морской дамбы, соединяющей острова Большой Соловецкий с Большой Муксалмой (постройка XIX в.), Соловецкие о-ва, Архангельская обл.

В полевых сезонах 2006, 2008-09 гг. на дамбах велись эксперименты с сейсмометрической регистрацией отклика блоковой среды на два основных типа воздействий: 1) плавные знакопеременные и 2) ударные. Первые соответствуют наиболее общему случаю и проявляются, например, в серии ритмов сейсмичности Фенноскандии, ассоциируемых с воздействием Срединно-Атлантического хребта (*Юдахин и др., 2003*). Вторые – явления отталкивания литосферной плиты от COX (push), вызванного, например, внедрением даек (*Грачев и др., 2008*).

Сейсмометрическая запись велась велосиметрами СМЗ-КВ и акселерометрами СМG-5Т (характеристики приведены в гл. 2) в 3-4 пунктах на гребнях дамб, регистрация трехкомпонентная (вертикальная Z и горизонтальные: вкрест X и вдоль Y дамб). Частоты очень слабых событий, на которые нацелены исследования, изучены недостаточно, принятый диапазон 0.5-70 Гц практически покрывает имеющиеся оценки: от 0.2-20 Гц (Кочарян, Спивак, 2003) до ~100 Гц (Касахара, 1985).

Эксперимент 1. В качестве плавных внешних воздействий на блоковую среду рассматривалась боковая нагрузка, создаваемая при штиле на морскую дамбу при подъеме и спуске воды океанического прилива. Длина дамбы между о. Б. Соловецкий и о. Б. Муксалма – 1.1 км, ширина ~10 м, высота ~6-7 м, из них ~2 м – постоянно под водой. Оценка изменение боковой нагрузки при подъеме воды составляет 0.1 бар, что сопоставимо с воздействиями, способными влиять на геодинамические процессы, например, в прибортовых зонах Нурекского водохранилища (*Мирзоев и др., 1987*). Записи микросейсм в направлении боковой нагрузки, т.е. вкрест дамбы (X) существенно отличаются от Y и Z по преобладанию высокочастотной (более 40 Гц) составляющей. Кроме того, на записях отмечен ряд более интенсивных микрособытий, характерная частота ~40 Гц. Именно эта величина приводится в (*Кочарян, Спивак, 2003*) как собственная частота колебаний блоков с размером 1 м, т.е. валунов, слагающих дамбу.

Для изучения связи с действием прилива особенностей высокочастотных микросейсм (выше 40 Гц) использована технология выявления микроимпульсов путем расчетов функции когерентности записей компонент $K_{ij}(f)(i, j = Z, X, Y)$ (*Kanycmян, Юдахин, 2007, Сейсмологические исследования..., 2011).* Получены оценки временного хода амплитуд и когерентности в скользящем вдоль записи временном окне. Сопоставление кривых на рисунке 6.7а показывает следующее. Низкочастотных - Сопоставление кривых на чувствуют» действия прилива. Для высокочастотных - зависимость временного хода амплитуд от вариаций уровня воды не простая – при подъеме наблюдается нарастание амплитуд, при спуске сначала ослабление, а затем нарастание. Подобный эффект отмечался для наведенной сейсмичности от водохранилищ (*Мирзоев и др., 1987;*

Капустян, Юдахин, 2007), где важен как уровень воды, так и скорость его изменения. Кривые когерентности, характеризующие потоки микроимпульсов, для пар Z-X, Z-Y (т.е. для вертикальных сечений вкрест и вдоль дамбы) имеют явный временной ход. Существенно, что они по форме подобны, что может указывать на действие механизма стесненного поворота при изменении нагрузки (*Кочарян, Спивак, 2003*).



а – временной ход амплитуд низкочастотных (н.ч., 1 Гц) и высокочастотных (в.ч., 40 Гц) микросейсм на X компоненте (верхние кривые) и расчетов когерентности для Z-Y, Z-X компонент в скользящем временном окне (нижние кривые);

 б – соответствующие кривым гистограммы когерентности при подъеме и спуске воды при приливе. Цифры – участки кривых при разных уровнях воды.

Рисунок 6.7 – Параметры сейсмического отклика морской дамбы на плавные воздействия при подъема и спуске воды при приливе

Кривые амплитуд и когерентности (рисунок 6.7а) изменяются во времени в «противофазе». В наивысшем уровне воды (I), амплитуда высокая при низкой когерентности, т.е. излучение характеризуется большим потоком слабых импульсов. При отливе на участках II и IV – ситуация обратная, тут отдельные импульсы относительно сильные, но их мало и они в сумме дают низкий уровень сейсмического излучения. Кроме того, на участке III спуска воды наблюдается рост амплитуд, сопровождаемый спадом когерентности, т.е. увеличением числа слабых событий. По существу, переход от участка II к III соответствует ситуации «обмена» более сильных сейсмических событий на серию слабых при вариации скорости нагружения (*Садовский и др., 1981*). Данный эффект выявлен для района Нурекской ГЭС при изменении скорости сброса воды, причем локализация эффекта относится именно к наиболее раздробленной области (*Капустян, Юдахин, 2007*).

Для очень слабых событий гистограмму оценки $K_{ij}(f)$ можно использовать как характеристику сейсмического режима среды в окрестности точки наблюдения. Сопоставление гистограмм когерентности для участков записи отдельно при подъеме и при спуске воды, изображенных на рисунке 6.76 показывает, что для сечений вкрест дамбы (Z-X), и вдоль нее (Z-Y) кривые различны, причем для сечения Z-X (в направлении воздействия прилива) отличия подъема и спуска большие, чем для пары Z-Y. Это доказывает генезис наблюдаемого высокочастотного излучения – действие боковой нагрузки на дамбу вследствие прилива.

Таким образом, валунная дамба как подобие геологического объекта отображает основные закономерности переработки средой внешних воздействий, тем самым встраивается в иерархию структур и является удачной натурной моделью блоковой среды при воздействиях нагрузок.

Использование калиброванной аппаратуры позволяет оценить величину сбрасываемых напряжений ($\Delta \sigma$) при сейсмическом излучении. При стесненном повороте (Кочарян, Спивак, 2003): $\Delta \sigma = v N G / L \pi f$. Подставляя экспериментальные значения: $v \approx 100$ нм/с – максимальная амплитуда импульсов на частоте 40 Гц, N=5 – число фаз записи. G=2*10¹⁰ Па (гранит), L=1 м – характерный размер блока, f=40 Гц, получаем: ∆σ ≈ 100 Па=10⁻³ бар. Эта оценка хорошо согласуется с определениями сброса напряжений в ряде районов с блоковым строением верхов коры (Кочарян, Спивак, 2003), что также указывает на достаточно хорошее подобие исследуемой натурной модели и истинной геодинамической ситуации. Учитывая величину нагрузки (0.1 бар), можно сделать заключение, что в высокочастотном сейсмическом излучении сбрасывается примерно 1% от действующей нагрузки (сейсмический КПД), что находится в хорошем согласии с оценками КПД (2-5%) при взрывных и естественных воздействиях (Садовский, 1992).

Эксперимент 2. Моделирование реакции блоковой среды на резкие изменения хода геодинамических процессов выполнено на валунной дамбы на озере во внутренней части о. Б. Соловецкий, т.е. вне действия морского прилива. Аналогичные работы велись и на морской дамбе. Источник воздействия – серия из 100 ударов кувалдой (частоты 20-80 Гц).

Характерные спектры мощности микросейсм после серии ударов показывают устойчиво повышение уровня на высоких частотах. Рассмотрим особенности временного хода амплитуд высокочастотного сейсмического отклика (срез на частоте 36 Гц). Материалы по совокупности точек регистрации и для экспериментов, проводившихся в разные годы (рисунок 6.8), показывают удивительно хорошую повторяемость пространственно-временной картины. Прежде всего, это приуроченность максимального отклика именно в центре дамбы и присутствие интервалов согласования временного хода, особенно в хвостовой части кривых. Отметим также повторение особенностей временного хода – «затишье» сразу после ударов и появление аномального всплеска амплитуд много позже воздействия (40 мин в 2008 г. и 70 мин в 2009 г.). Эта разница во временах отражает различия в условиях экспериментов – в дождливое лето 2008 г. и сухое 2009 г., что могло проявиться в увлажнении глины, т.е. в изменениях связей между валунами, влияющих на

упруго-вязкие свойства натурной модели. Подтверждением этого также является на порядок меньший уровень амплитуд записей как ударов, так и откликов среды в 2009 г.



Кривые временного хода после ударов для амплитуд на разных станциях раздвинуты по уровню, монтажи подобраны в зависимости от расстояния от пункта возбуждения (ПВ). Звездочкой отмечены аномальные всплески. На врезке – схема эксперимента с отображением амплитуд собственных колебаний дамбы



Аналогичный эксперимент с импульсным воздействием в 2009 г. на более крупную морскую дамбу, показанный на рисунке 6.9 качественно не противоречит предыдущему. Отмечается резкий всплеск временного хода амплитуд в серединах дамб, что видно на рисунках 6.8 и 6.9, причем на ст. 2, он выше, чем на ст. 3, более близкой к ПВ (рисунок 6.9). Это связано с эффектом увеличения в отмеченных точках локального напряженнодеформированного состояния. На малой дамбе причиной являются собственные колебания дамбы, что отражено в пике на частоте 2 Гц в спектре и на эпюре амплитуд низкочастотных колебаний (рисунок 6.8). На морской – наличие концентратора напряжений в виде своеобразной арки в теле дамбы.

Для оценки сейсмического КПД, учитывая примерно одинаковые частоты и количество фаз у воздействия (на записи удара) и у отклика, а также то, что $\sigma \sim v$, получаем на озерной дамбе $\frac{v_{\text{откл}}}{v_{\text{удара}}} \approx \frac{4 \cdot 10^{-8} \text{м/c}}{4 \cdot 10^{-6} \text{м/c}} = 0.01$, т.е. как и в эксперименте 1, КПД оценивается в 1%; на морской дамбе также была получена величина ~ 1-2%. Учитывая, что при ударах в среду «входит» не более 10 % энергии от воздействия, «полный» сейсмический КПД будет менее 0.1%.



Кривые временного хода амплитуд на разных станциях раздвинуты по уровню, монтажи подобраны в зависимости от расстояния от пункта возбуждения (ПВ). Черными полосами отмечено время проведения ударов, скобками – интервалы подобия кривых, звездочкой – аномальный всплеск амплитуд. На врезке – схема эксперимента

Рисунок 6.9 – Пространственно-временная картина амплитуд высокочастотного (36 Гц) сейсмического отклика на горизонтальной компоненте после воздействия ударов на морской дамбе

Остановимся на новых, по нашему мнению, экспериментальных фактах и соображениях. Частоты ритмов нагружения в первом эксперименте были на 6 порядков ниже отклика, а во втором – сопоставимы. Из равенства КПД следует, что сейсмическое излучение порождено локальным механизмом деформирования блоков, причем этот механизм не зависит от типов воздействия (плавные или ударные). Наиболее вероятен по аналогии с натурной моделью – стесненный поворот по (Кочарян, Спивак, 2003). Для передачи напряжений от СОХ не исключаются присутствие в литосфере своеобразных «усилителей» – концентраторов напряжений типа тектонических узлов или моренных структур (озов).

Для определения типа воздействия на блоковую среду при анализе сейсмичности наиболее информативны следующие оценки. Для плавных процессов – построение графиков повторяемости в скользящем временном окне, со слежением за вариацией его наклона – задача для платформ трудновыполнимая, т.к. требует огромной статистики. Более обнадеживающий путь – анализировать микросейсмы таким способом, как показано выше. Предпочтительны пункты наблюдения на структурах типа озов (esker), учитывая, что озы являются природным аналогом дамб. Как показано выше, наблюдения на подобных структурах обладают «повышенной чувствительностью» для изучения геодинамических процессов. Импульсные геодинамические воздействия проследить легче, тут ключевым является выявление всплесков временного хода мощности и слежение за его

миграцией в разных точках. Это может служить основой для оценок упруго-вязких параметров литосферы и построения соответствующих карт. В анализируемые сейсмические данные следует также включить и высокочастотные микросейсмы, особенно в точках «повышенной чувствительности».

И, наконец, полученные значения сейсмического КПД позволяет в картине инициации платформенной сейсмичности вследствие воздействия СОХ не требовать очень высоких (критических) значений напряжений для разрывных структур, (как например (Gomberg et al., 2000)).

Таким образом, полученные результаты показывают, что антропогенные сооружения, в том числе валунно-глиняные дамбы можно успешно использовать для натурного моделирования геодинамических процессов в блоковой среде, причем получать сведения, практически недоступные ни математическому, ни лабораторному моделированию. Тем самым, помимо подтверждения иерархического строения геологической среды в широком диапазоне масштабных уровней, в научный оборот геолого-геофизических методов вводится новый элемент – исследования на натурных моделях геологических сред.

Выводы

Перспективным направлением развития систем сейсмического мониторинга на территориях Крайнего Севера является создание Федеральной арктической сейсмической сети РФ, объединяющей в себе мониторинг территории Российской Арктики и мониторинг ответственных объектов: протяженных линий железнодорожных магистралей, Северного морского пути, объектов нефтегазового комплекса и пр.

Кроме практических результатов по обеспечению безопасного функционирования антропогенных объектов, подобный подход открывает огромные перспективы для развития фундаментальных научный исследований, как в области геофизики, так и в других науках, прежде всего в строительстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в ходе выполнения работы:

1. В период 2010–2016 гг. на территории Архангельской области, включая арктические регионы, создана и введена в международное пользование УНУ «Архангельская сейсмическая сеть» (<u>http://fciarctic.ru/index.php?page=geoss</u>). Расположение станций и аппаратурное оснащение сети позволяют использовать ее как универсальный инструмент, предназначенный для решения различных задач: от изучения глубинного строения земной коры до готовности к выявлению ЧС природного и техногенного характера. Результаты наблюдений позволили расширить зону текущего мониторинга сейсмической обстановки Европейского сектора Арктики до 100° в.д. Выполнено сейсмотектоническое структурирование Баренцевоморского региона – основа для оценки сейсмической опасности. Потребителями информации сейсмоониторинга являются научные организации, в том числе международный сейсмологический центр ISC, а также федеральные и региональные органы власти, МЧС.

2. Разработан многоканальный аппаратурно-программный комплекс, позволяющий вести мониторинг крупного природно-техногенного объекта. Конкретное применение вплоть до ввода в промышленную эксплуатацию выполнено для контроля состояния гидротехнических сооружений (ГТС) на Чиркейской ГЭС (Кавказ), путем объединения нескольких систем мониторинга, основанных на регистрации механических колебаний. Система мониторинга позволяет: осуществлять контроль состояния конструкций и грунтов основания плотины; обнаруживать на ранней стадии опасные гидродинамические явления; вести сейсмологические наблюдения и выделять события разной силы и природы (землетрясения, пуски гидроагрегатов и пр.).

3. Разработан набор сейсмических способов оперативного обследования и мониторинга состояния конструкций, грунтов основания и площадок размещения антропогенных объектов различного назначения при высоком уровне промышленных шумов. Способы не требуют применения специальных источников воздействия, просты и оперативны в исполнении, позволяют выполнять как рекогносцировочные наблюдения (обследования), так и вести постоянный мониторинг состояния сооружений и грунтов оснований при условии оснащения объекта надлежащей аппаратурой.

4. Разработана методика тестовых нагрузок, которая эффективна для обследования состояния антропогенных объектов при решении следующих задач:

 – оценка дополнительных нагрузок от предполагаемых механических колебаний на существующие сооружения и возможность проверки пригодности применяемых мероприятий по виброзащите,

 верификация расчетной модели сооружения как в процессе эксплуатации, так и на ранней стадии строительства.

5. Волновые поля, записанные чувствительными сейсмическими датчиками и регистраторами с большим динамическим диапазоном, содержат информацию, характеризующую работу агрегатов ГЭС и могут быть использованы для обнаружения опасных процессов на ранней стадии их развития, например, гидравлических возмущений в проточном тракте гидротурбины (формирование кавитационного жгута).

6. Процессы, определяемые функционированием агрегатов приплотинных ГЭС, могут порождать механические колебания, по сейсмической интенсивности сравнимые с опасными воздействиями. Эти колебания изучены недостаточно полно, не входят в перечень опасных явлений, не являются объектами традиционного мониторинга и, как следствие, не отражены в нормативах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абелев А.С., Соловьева А.Г. Гидравлические условия пропуска расходов через здания строящихся гидростанций // Л.: Изв. ВНИИГ, 1983, т. 168. С. 71–78.

2. Аветисов Г.П. Вклад сейсмологических исследований в изучение геологии и промышленное освоение Арктики // Теория и практика морских геолого-геофизических исследований. Геленджик: ГП НИПИокеангеофизика, 1999. С.118–120.

3. Аветисов Г.П. Сейсмоактивные зоны Арктики // Комитет РФ по геологии и исследованию недр ВНИИ Океанология, Спб., 1996. 186 с.

4. Аветисов Г.П., Голубков В.С. Тектоно-сейсмическое районирование Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана и сопредельных акваторий // Геология и полезные ископаемые севера Сибирской платформы. Л.: Изд-во НИИГА, 1971. С.66–73.

5. Аветисов Г.П. Сейсмическое районирование Земли Франца-Иосифа // Геофизические методы разведки в Арктике. Вып. 6. Л.: Изд. НИИГА. 1971. С. 128–133.

 Аветисов Г.П., Булин Н.К. Глубинное строение Земли Франца-Иосифа по сейсмологическим данным // Геофизические методы разведки в Арктике. Сборник статей. Вып. 9, 1974. С. 26 – 32.

7. Адушкин В.В. Сильные природно-техногенные землетрясения как особый вид тригерной сейсмичности // Тригерные эффекты в геосистемах. Под ред. академика РАН В.В. Адушкина и профессора Г.Г. Кочаряна. Материалы второго Всероссийского семинара-совещания г. Москва, 18–21 июня 2013 г. М.: ГЕОС, 2013. С. 10–33.

8. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЭК, 2005. 252 с.

9. Айме К.А. Мониторинг зданий и котлованов, ч. 2 // Строительные материалы, оборудование, технологии века, № 11, 2005. С. 37–39.

Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / отв. ред.
 Г.М. Цибульчик. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео» Издательства СО РАН,
 2004. 387 с.

Александров А.Л., Володин А.А. Дададжанов И.А., Зеликман Э.И., Николаев
 А.В. Изучение периодического сейсмического сигнала от Нурекской ГЭС // Исследования
 Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.: Наука, 1981. С. 260–265.

12. Александров А.Л., Володин А.А., Зеликман Э.И., Невский М.В. Прибор для изучения периодических сейсмических сигналов // Сейсмические приборы, вып. 13. М.: Наука, 1980. С. 158–164.

13. Александров С.И., Мирзоев К.М. Мониторинг эндогенного микросейсмического излучения в районе Ромашкинского нефтяного месторождения // Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997. С. 176–188.

14. Ананьин И. В. Европейская часть СССР, Урал и Западная Сибирь // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. С. 465-470.

15. Аникин О.П., Горшенин Ю.В., Козлов А.М. Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами // ЦНИИС Минтрансстроя СССР. М., 1985.

16. Антоновская Г.Н. Особенности построения Архангельской системы сейсмического мониторинга // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Девятой Межд. Сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 41–45.

17. Антоновская Г.Н., Афонин Н.Ю., Басакина И.М., Капустян Н.К., Басакин Б.Г., Данилов А.В. Возможности сейсмических методов для оценки состояния земляного полотна железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера // Транспортные системы и технологии. Выпуск 3(9), 2017. С. 133-161.

 Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Конечная Я.В. Распределение сейсмичности и аномалии теплового потока Баренцевоморского региона // Геотектоника, 2018, № 1. С. 52–62.

19. Антоновская Г.Н., Данилов А.В. Организация пунктов сейсмических наблюдений в условиях Европейского Севера России на примере функционирования пункта «Земля Франца-Иосифа» // Проблемы Арктики и Антарктики № 4 (102) 2014. С. 24–33.

20. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М. Сейсмометрические методы прогноза ударных и вибрационных воздействий на проектируемые или реконструируемые здания // Геотехнические проблемы мегаполисов. Т. 5. М.: ПИ «Геореконструкция», 2010. С. 1719–1727.

21. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М., Климов А.Н. Возможности сейсмометрического мониторинга реконструируемых зданий и хранилищ сжиженного газа // Предотвращение аварий зданий и сооружений. Вып. 9. М.: «Магнитогорский дом печати», 2010. С. 206–220.

22. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Дубинский С.И., Басакина И.М. Сейсмическая методика пробных воздействий для оценки состояния сооружений: результаты и возможности // 12-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика 2016», 25-29 апреля 2016. Анапа, Россия. Электронный ресурс:

http://earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=84343. DOI: 10.3997/2214-4609.201600352

23. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Кременецкая Е.О. Концепция сейсмического мониторинга в Арктике для снижения риска природных и техногенных катастроф // Конкурентный потенциал северных и арктических регионов: Сб. научных трудов / Отв. ред. д.э.н. В.И. Павленко. Архангельск, АНЦ УрО РАН, 2014. С. 5–10.

24. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Рогожин Е.А. Сейсмический мониторинг промышленных объектов: проблемы и пути решения // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51, № 1. С. 5-15.

25. Антоновская Г.Н., Ковалев С.М., Конечная Я.В., Смирнов В.Н., Данилов А.В. Пункт временных сейсмических наблюдений на арх. Северная Земля // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. XII Международной сейсмологической школы / Отв. редактор А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 24–28.

26. Антоновская Г.Н., Конечная Я.В., Морозов А.Н. Сейсмическая активность Арктической зоны: новые данные по Западному сектору // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 16–25.

27. Антоновская Г.Н., Морозов А.Н., Афонин Н.Ю., Данилов А.В., Федоренко И.В., Ваганова Н.В., Басакина И.М., Михайлова Я.А., Конечная Я.В., Кошкин А.И. Экспериментальный аппаратно-программный комплекс мониторинга и детектирования вариаций параметров сейсмического режима в западной арктической зоне РФ // «Природные ресурсы и комплексное освоение прибрежных районов Арктической зоны». Материалы Второй Международной научной конференции. Архангельск, 2016. С.3–6.

28. Антоновская Г.Н., Рогожин Е.А., Капустян Н.К. Мониторинг природнотехногенных опасностей Северного морского пути // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. № 6. 2017. С. 85–86. ISSN 2221-5638

29. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР / Редакторы: Аранович Ж.И., Кирнос Д.П., Фремд В.М. М.: Наука, 1974. 254 с.

30. Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Генерирование искусственных акселерограмм методом масштабирования реальных записей // Физика Земли. 2002. № 7. С. 39–45.

31. Арм В.Х., Окулов В.Л., Пылев И.М. Неустойчивость напорных систем гидроэнергоблоков // Известия Академии Наук, Энергетика. 1996. № 3.

32. Артюшков Е.В. Механизм образования сверхглубоких осадочных бассейнов. Растяжение литосферы или эклогитизация // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 12. С. 1675–1686.

33. Ассиновская Б.А. Землетрясения Баренцева моря. М.: НГК РАН, 1994. 126 с.

34. Ассиновская Б.А., Соловьев С.Л. Опыт выделения и характеристики зон возможных очагов землетрясений в Баренцевом море // Физика Земли. 1993. № 2. С 23–37.

35. Аськов В.Л. Физическое моделирование сейсмонапряженного состояния арочных плотин (при задании воздействия акселерограммой) // Автореф. на соискание уч. степени канд. техн. наук. 1986 Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat <u>http://www.dissercat.com/content/fizicheskoe-modelirovanie-seismonapryazhennogo-</u>

 $\underline{sostoyaniya}-arochnykh-plot in-pri-zadanii-vozd\#ixzz53CybCe3p$

36. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. Российская Федерация / под общ. ред. С.К. Шойгу. М.: Феория, 2011. 720 с.

37. Ашпиз Е.С. Мониторинг эксплуатируемого земляного полотна: Теоретические основы и практические решения // Автореф. диссер. на соискание уч. степени д-ра техн. наук по специальности 05.22.06. М., 2002.

38. Байчиков Л.Н., Калинцева И.С, Серков В.С., Шейнин И.С. Типовой динамический паспорт гидротехнических сооружений электростанций // Гидротехническое строительство, 1994, № 6

39. Балуев А.С. Континентальный рифтогенез севера Восточно-Европейской платформы в неогее: геология, история развития, сравнительный анализ / Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра геол.-мин. наук. Москва, 2013. 49 с.

40. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации / Учебное пособие. СПб.: СПбГМТУ, 2004. 156 с.

41. Басакина И.М. Комплекс сейсмических методов для диагностики состояния архитектурных памятников // Автореф. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Архангельск, 2011.

42. Белоглазов А.В. Автоматическая система контроля и диагностики гидроагрегатов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. Специальный выпуск №1. Новосибирск, изд-во НГАВТ, 2009. С. 127–130.

43. Белоглазов А.В. Разработка адаптивных средств выявления неисправностей и стратегии обслуживания гидроагрегатов // Автореф. дис. канд. техн. наук. Новосибирск, 2011. 24 с.

44. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. 254 с.

45. Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. № 9. 2014 <u>http://burneft.ru/archive/issues/2014-09/2</u> (Дата обращения 20.12.2017)

46. Бондаренко В.Б., Волшаник В.В., Иванова Т.А., Роева Л.А., Федоров А.Б. Закрученый поток жидкости в изогнутых водоводах // Тр. МИСИ, вып.187. М., 1984. С. 107–113.

47. Бронштейн В.И., Бугаевский А.Г. О динамической безопасности гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство, 2012, № 4. С. 35–37.

48. Брызгалов В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской ГЭС. 1998. http://03-ts.ru/index.php?nma=downloads&fla=stat&idd=826.

49. Бугаев Е.Г., Кишкина С.Б., Санина И.А. Особенности сейсмологического мониторинга районов размещения объектов атомной энергетики на Восточно-Европейской платформе // Ядреная и радиационная безопасность. № 3 (65) 2012. www.secnrs.ru

50. Бугаевский А.Г, Егоров А.Ю., Никифоров А.А. Системы сейсмических наблюдений на гидротехнических сооружениях ОАО "РусГидро" // ХІ Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию. Тезисы докладов. 2015. С. 83.

51. Бунгум Х., Хьюртенберг Э., Ризбо Т. Использование сейсмических колебаний, генерируемых плотиной гидроэлектростанции, для изучения вариаций сейсмических скоростей // Исследования Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.: Наука, 1981. С. 248–259.

52. Бурмаков Ю.А., Винник Л.П., Треусов А.В. Построение трехмерной модели среды по наблюдениям объемных рефрагирован-ных волн. Докл. АН СССР. Т. 269, № 2, 1983. С. 320-323.

53. Быков В.Г. Деформационные волны земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1176-1190.

54. Ваганова Н.В. Строение земной коры и верхней мантии севера русской плиты по наблюдениям обменных волн от телесейсмических землетрясений // Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2012. 23 с.

55. Ваганова Н.В. Применение метода приемных функций для определения скоростной структуры на севере ВЕП и в Арктике. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. XI Международной сейсмологической школы / Отв. редактор А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. – С. 75-78.

56. Василевский А.Г., Козлов А.Б. О внедрении "Типового динамического паспорта сооружений электростанций" // Гидротехническое строительство, 2012, № 4. С. 32–35.

57. Велком-Сибирь [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.velcoms.ru (Дата обращения 18.06.2013).

58. Верба М.Л. Современное билатеральное растяжение земной коры в Баренцево-Карском регионе и его роль при оценке перспектив нефтегазоносности // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. Т.2. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.ngtp.ru/rub/4/026.pdf (Дата обращения 3.05.2017).

59. Верхоланцева Т.В., Дягилев Р.А. Количественная оценка влияния горнотехнических параметров отработки месторождения на сейсмический режим // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы третьего Всероссийского семинарасовещания / Под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2015. С. 214-220.

60. Виноградов А.Н., Баранов С.В. Возможное влияние оползневых процессов на сейсмичность северо-западной части Баренцева моря // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 99–103.

61. Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А., Кременецкая Е.О., Петров С.И. Формирование системы сейсмологического и инфразвукового мониторинга в западной Арктике в XX веке и перспективы ее дальнейшего развития // Вестник КНЦ РАН. 2012. № 4. С. 145–163.

62. Виноградов Ю.А., Пятунин М.С. Сейсмологический мониторинг на Северном Ямале. Первые результаты // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. XII Международной сейсмологической школы / Отв. редактор А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 92–95.

63. Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Таракановский В.К., Климов А.Н. Мониторинг в процессе строительства напряженно-деформированного состояния несущих конструкций и грунтов основания высотных зданий в Москве // Будівельні конструкції. Вып. 73. 2010 С. 461–467.

64. Воскресенский М.Н. Разработка аппаратных и программных модулей регистратора сейсмических сигналов «Регистр» для изучения сейсмодинамических характеристик объектов и сред // Автореф. диссертации на соискание уч. степени канд. техн. наук. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2017.

65. Высокочувствительные сейсмические датчики линейного и вращательного движения, разработанные на основе инновационной молекулярно-электронной технологии [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.r-sensors.ru/ (Дата обращения 18.06.2013).

66. Габсатарова И.П. Внедрение в рутинную практику подразделений Геофизической службы РАН процедуры вычисления локальной магнитуды // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 49-53.

67. Гамзатов Т.Г., Саидов М.А., Баксараев А.М., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Инновационная сейсмологическая система мониторинга плотин ГЭС в Дагестане // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века №5, 2014. С.28–31.

68. Геоакустика [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://geophone.narod.ru/TTX/ttx.html (Дата обращения 18.06.2013).

69. Герда [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://gerda.ru/ (Дата обращения 18.06.2013).

70. ГК «Диамех». Стационарная система виброконтроля, мониторинга и диагностики гидроагрегатов АЛМАЗ-7010-ГЭС [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.diamech.ru/almaz_ges.html (дата обращения 09.03.17)

71. ГК «Новые технологии»: Системы мониторинга состояния и диагностики оборудования, датчики вибрации и пр. Bently Nevada [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://bently.nt-rt.ru/index.php/component/content/?view=featured (дата обращения 22.03.2017)

72. ГК «Ракурс» АСУ ТП ГЭС [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.rakurs.com/asu-tp/ges/ (дата обращения 07.03.17).

73. Горбатиков А.В. Способ сейсморазведки. Пат. РФ № 2271554. Бюл. изобр.
2006, № 7.

74. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66–84.

75. Горбатиков А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования.// Физика Земли, 2011, №4. С. 96-112.

76. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Дрозднин Д.В. Козырева Н.П., Левина В.И., Сергеев В.А., Сенюков С.Л., Ящук В.В. Сбор, обработка и хранение сейсмологической информации // Сб. статей «Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки». Петропавловск-Камчатский, 2004. С.43-61.

77. Горшков Г.П. О сейсмичности восточной части Балтийского щита // Тр. Сейсмологического института. Вып. 19. 1947. С. 86–89.

78. ГОСТ 17624-2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности (с Поправкой). М., 2014.

79. ГОСТ Р 22.1.11-2002 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг состояния водоподпорных гидротехнических сооружений (плотин) и прогнозирование возможных последствий гидродинамических аварий на них. Общие требования. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>http://internet-law.ru/gosts/gost/6292/</u> (Дата обращения 20.12.2017).

80. ГОСТ Р 22.1.12–2005 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. «Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений». Общие требования. М., 2005 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>http://docs.cntd.ru/document/1200039543</u> (Дата обращения 20.12.2017).

81. ГОСТ Р 52892–2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию.

82. ГОСТ Р 53778-2010 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Общие требования.

83. ГОСТ Р 53964-2010 Вибрация. Измерения вибрации сооружений. Руководство по проведению измерений [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/gost-r-53964-2010 (дата обращения 18.09.2017)

84. ГОСТ Р 54382-2011. Подводные трубопроводные системы. Общие технические требования.

85. ГОСТ Р 54859-2011 Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний.

86. ГОСТ Р 55260.1.5-2012 Гидроэлектростанции. Часть 1-5. Сооружения ГЭС гидротехнические. Требования к проектированию в сейсмических районах.

87. ГОСТ Р 55260.2.2-2013 Гидроэлектростанции. Часть 2-2. Гидрогенераторы. Методики оценки технического состояния.

88. ГОСТ Р 55260.3.2-2013 Гидроэлектростанции. Часть 3-1. Гидротурбины. Методики оценки технического состояния.

89. ГОСТ Р 57123-2016 Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Проектирование с учетом сейсмических условий. М.: Стандартинформ, 2016.

90. Градостроительный кодекс Российской Федерации. Статья 48.1. Особо опасные, технически сложные и уникальные объекты. 2013 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ppt.ru/kodeks.phtml?kodeks=5&paper=48.1

91. Грачев А.Ф., Мухамедиев Ш.А., Юнга С.Л. Влияние силы отталкивания от срединно-океанических хребтов на сейсмичность прилегающих платформенных областей: новые доказательства // ДАН. 2008. Т. 419. № 6. С. 816-819.

92. Гроздов В.Т. Техническое обследование строительных конструкций, зданий и сооружений. Санкт-Петербург: «Центр качества строительства», 1998.

93. Гупта Х., Растоги Б. Плотины и землетрясения. М: Мир. 1979. 253 с.

94. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка / Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. М.: Недра, 1980, 551 с.

95. Данилов А.В., Антоновская Г.Н., Конечная Я.В. Особенности установки пунктов регистрации сейсмических событий в Арктическом регионе России // Сейсмические приборы. 2013. Т 49. № 3. С. 5–24.

96. Данилов К.Б., Афонин Н.Ю., Кошкин А.И. Строение трубки «Пионерская» Архангельской алмазоносной провинции по данным комплекса пассивных сейсмических методов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2017. № 2. Выпуск 34. С. 90–98.

97. Дедков В.Н., Быков Ю.А. Численное моделирование течения жидкости в рабочем колесе радиально-осевой обратимой гидромашины // Вестник НТУ "ХПИ": Динамика и прочность машин, 2002. Вып. 12. № 9.

98. Динамический паспорт гидротехнического сооружения Саяно-Шушенской ГЭС // ОАО «УКГидро ОГК», Черемушки. 2005. 26 с.

99. Добрецов Н.Л., Конторович А.Э. Проблемы геологии и нефтегазоносности Арктики (вместо предисловия) // Геология и геофизика. Т. 54. №8. Новосибирск: СО РАН, 2013. С. 967-971.

100. Добромыслов А.Н. Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений. М.: Изд-во ассоциаций строительных вузов, 2006. 256 с.

101. Довгань В.И. Моделирование динамических параметров плотины Токтогульской ГЭС при индуцированной сейсмичности // Автореф. дис. на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук. Бишкек, 2006. 20 с.

102. Договор № 1–407–1508/ОГ–175–13–2013. «Разработка метода учета влияния тектонических разломов на напряженно-деформированное состояние плотин и оснований высоконапорных ГЭС».

103. Дорофеев В.М., Катренко В.Г., Назьмов Н.В. Автоматизированная станция мониторинга технического состояния несущих конструкций высотных зданий // Уникальные и специальные технологии в строительстве (UST-Build 2005). М.: ЦНТСМО, 2005. С. 66–67.

104. Дягилев Р.А. Макросейсмика техногенных землетрясений Урала // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 3. С. 292–304.

105. Дягилев Р.А. Пакет прикладных программ для узких задач сейсмического мониторинга. Спектральный анализ сейсмических шумов. Пермь: ГИ УрО РАН, 2012. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>http://www.mi-perm.ru/solution/nr?show_id=29</u>.

106. Егоркин А.В. Геологическая информативность многоволнового ГСЗ на примере изучения Севера Европейской части // Региональная геология и металлогения, № 10, 2000. С.85 – 89.

107. Еманов А.Ф., Бах А.А., Еманов А.А. Применение метода стоячих волн в исследовании инженерных сооружений сложных конструкций и в сейсмическом микрорайонировании // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. № 6. 2017.

108. Еманов А.Ф., Селезнёв В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчёт стоячих волн при детальных инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика, №2, 2002. С. 192–207.

109. Жданова Ю.Е. Разработка методов и средств эксплутационного контроля вибрационного состояния мощных гидроагрегатов // Автореф. дис. канд. техн. наук. М., 1984 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.dissercat.com/content/razrabotka-metodov-i-sredstv-eksplutatsionnogo-kontrolya-vibratsionnogo-sostoyaniya-moshchny.

110. Завалишин С.И., Шаблинский Г.Э. Натурные наблюдения и расчет динамических характеристик плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство, 2015, № 2. С. 52–59.

111. Задериголова М.М., Лопатин А.С. Применение радиоволнового метода контроля для обеспечения безопасности газотранспортных систем // Учебное пособие. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. 72 с.

112. Зайончек А.В., Брекке Х., Соколов С.Ю., Мазарович А.О., Добролюбова К.О., Ефимов В.Н., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Кохан А.В., Мороз Е.А., Пейве А.А., Чамов Н.П., Ямпольский К.П. Строение зоны перехода континент-океан северо-западного обрамления Баренцева моря (по данным 24, 25 и 26 рейсов НИС «Академик Николай Страхов», 2006-2009 гг.) // Строение и история развития литосферы. Вклад России в Международный Полярный Год. Т..4. М.: Paulsen. 2010. С.111-157.

113. Замахаев А.М. Пространственные закономерности изменения скоростей упругих волн по данным долговременных ультразвуковых наблюдений в основании

арочной плотины Ингури ГЭС // Сб. Геолого-геофизические исследования в районе Ингури ГЭС Тбилиси. Мицниереба, 1981. С. 206-216.

114. Зубков Д.А. Особенности динамических явлений в строительных конструкциях зданий: Методика и результаты экспериментальных исследований / Автореферат на соискание степени канд. техн. наук. М., 2002. [Электронный ресурс] – Режим доступа: disserCat http://www.dissercat.com/content/osobennosti-dinamicheskikh-yavlenii-v-stroitelnykh-konstruktsiyakh-zdanii-metodika-i-rezulta#ixzz2r6cmpsYA

115. Иванова Г.М. Сравнительный анализ естественных сейсмоакустических импульсов и импульсов, возбуждаемых производственными работами // Применение сейсмоакустических методов в горном деле. М.: Наука, 1964. С. 144-149.

116. Иванченко И.П., Прокопенко А.Н. Анализ систем мониторинга и диагностики технического состояния гидротурбин // Гидротехника, 2011, № 2, с. 24-30.

117. Ивлева Е.А., Бормотов В.А., Егоров А.Ю., Никифоров А.А., Скоморовская Е.Я. Комплексный подход к инженерно-сейсмометрическим и инженерносейсмологическим наблюдениям на Бурейской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2016. Т. 280. С. 43-52.

118. Измерительное оборудование [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://zetlab.com/ (Дата обращения 04.01.2018)

119. Инжиниринговый цент [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://basisic.ru/ (Дата обращения 04.01.2018)

120. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях единой системы сейсмических наблюдений СССР. М.: Наука, 1981. 275 с.

121. Интеллектуальные системы автоматизации технологии [Электронный pecypc] – Режим доступа: http://www.insat.ru (Дата обращения 18.06.2013).

122. Исследования Земли невзрывными сейсмическими источниками / Отв. ред.А.В. Николаев, И.Н. Галкин. М.: Наука, 1981. 336 с.

123. Кабель ПТРК. [Электронный ресурс] – Режим доступа:http://www.myfreedom.ru/articles/tekhnika-svyaz/30-kabeli-svyazi/43-kabel-ptrk(Датаобращения 19.12.2017)

124. Кабельно-проводниковая продукция, продажа из наличия и под заказ. // [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://slavcabel.ru (Дата обращения 18.06.2013).

125. Каминский В. Д., Супруненко О. И., Лазуркин Д. В., Посёлов В. А. Проблемы изучения глубоководных нефтегазоперспективных осадочных бассейнов

евразийской континентальной окраины и ложа Северного Ледовитого океана // Горный журнал. 2012. № 3. С. 77-80.

126. Капустян Н.К. Сейсмобезопасность: обобщение опыта мониторинга зданий и сооружений // Проектирование и инженерные изыскания. № 4(18). 2012. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.acdjournal.ru/Priz%2018/3/p.html

127. Капустян Н.К. Техногенная эрозия литосферы – плата за прогресс // Наука в России, М., 2000. №2. С. 15-23

128. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М. Сейсмометрическая диагностика состояния здания в задачах реставрации // В мире неразрушающего контроля 4 [54]: Ежеквартальный журнал. - Санкт-Петербург, 2011. С. 16–20.

129. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Глотов В.С. Комплекс инженерно-сейсмометрических методик для оценки состояния зданий и сооружений // Наука и безопасность, 5. 2012. С. 40-61.

130. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Пудова И.В. Сейсмометрические методы определения состояния сооружений и допустимых нагрузок от вибровоздействий // Жилищное строительство. 2013. № 9. С. 30–33.

131. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Климов А.Н. Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании // Жилищное строительство. 2013. № 11. С. 6–12.

132. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Климов А.Н., Басакина И.М. Оценка сильных сейсмических воздействий на здания по наблюдениям слабых вибраций / Жилищное строительство. № 3. 2015. С. 37-42.

133. Капустян Н.К., Вознюк А.Б. Опыт проектирования и эксплуатации схем мониторинга конструкций и оснований высотных зданий [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ingil.ru/nashipublikacii/high-rise-building/16-monitoring.html (дата обращения: 28.04.2017)

134. Капустян Н.К., Таракановский В.К., Вознюк А.Б., Климов А.Н. Действующая система мониторинга высотного жилого здания в Москве // 2010. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>http://www.pamag.ru/pressa/vjz-monitor-system</u> (Дата обращения: 01.01.2018)

135. Капустян Н.К., Таракановский В.К., Вознюк А.Б., Климов А.Н., Беспалова А.В. Опыт проведения геотехнического мониторинга высотного здания в Москве // Геотехнические проблемы мегаполисов М.:ПИ «Геореконструкция» Т. 4. 2010. С. 1252–1259

136. Капустян Н.К., Юдахин Ф.Н. Сейсмические исследования техногенных воздействий на земную кору и их последствий // Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 416 с.

137. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 264 с.

138. Катценбах Р., Вейдле А., Рамм Х. Геотехнические основы моделирования совместной работы здания и основания // Реконструкция городов и геотехническое строительство. С-Пб.: АСВ, 2003. № 7. С. 105–114.

139. Катценбах Р., Шмитт А., Рамм Х. Основные принципы проектирования и мониторинга высотных зданий Франкфурта-на-Майне. Случаи из практики // Реконструкция городов и геотехническое строительство, № 9, С-Пб, АСВ. 2005. С. 80-99.

140. Кашубин С.Н., Павленкова Н.И., Петров О.В., Мильштеин Е.Д., Шокальский С.П., Эринчек Ю.М. Типы земной коры Циркумполярной Арктики // Региональная геология и металлогения. 2013а. № 55. С. 5–20.

141. Кикоин И.К., Садовский М.А., Негматуллаев С.Х. Испытания н сейсмостойкость зданий и сооружений. 1985. 82-93.

142. Кныш Ю.А., Урывский А.Ф. Модель прецессии вихревого ядра закрученной струи // Изв. вузов, Авиац. техника, 1984, № 3. С. 41-44.

143. Коммерсантъ № 87 от 23.05.2014 – статья Игорь Сечин вышел к Баренцеву морю / «Роснефть» купит «Печору СПГ» // Газета [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.kommersant.ru/doc/2476899 (Дата обращения 29.01.2015).

144. Компания ООО ТД «Югтелекабель» [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.yugtelekabel.ru/ (Дата обращения 18.06.2013).

145. Кондратьев В.Г. Вековая, но не вечная же проблема железных дорог на вечной мерзлоте // Транспорт Российской Федерации. № 3–4 (16–17) 2008. С. 58-61.

146. Кондратьев В.Г. Опыт строительства и проблемы стабилизации земляного полотна Цинхай-Тибетской железной дороги на участках вечной мерзлоты // Транспорт Российской Федерации. № 6 (25). 2009. С. 52- 55.

147. Конечная Я.В. Изучение особенностей природной сейсмичности западного сектора Арктики по данным станций Баренц-региона // Автореф. диссер. канд. техн. наук. Архангельск, ООО «Гефест», 2015. 24 с.

148. Конечная Я.В., Ваганова Н.В., Морозов А.Н., Носкова Н.Н. Землетрясение на Полярном Урале 24 декабря 2012 года // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Восьмой Межд. Сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 179-183.

149. Короленко Д.Б. Модель информационной системы сейсмометрического мониторинга для контроля технического состояния плотин ГЭС // Вестн. Новосиб. гос. унта. Серия: Информационные технологии. 2014. Т. 12, вып. 3. С. 78–85.

150. Корчинский И.Л. Колебания высотных зданий. М.: Государственное издательство по строительству и архитектуре, 1953. 44 с.

151. Костюченко С.Л. Глубинные модели севера Восточно-Европейской платформы и прилегающих районов // Строение литосферы Российской части Баренцрегиона /под ред. Н.В. Шарова, Ф.П. Митрофанова, М.Л. Вербы, К. Гиллена. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005, С.80.

152. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. Ред. В.В. Адушкин. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 423 с.

153. Кузьменко А.П., Бортников П.Б., Сабуров В.С. Контроль технического состояния бетонных плотин по динамическим характеристикам их колебаний // Известия ВНИИГ им Б.Е. Веденеева. 2007. Т.248. С. 64-76.

154. Кузьмин Н.Г. Усовершенствованная система контроля состояния бетонных плотин (на примере Красноярской ГЭС) // Автореф. на соискание уч. степени канд. техн. наук. С.-Петербург: «ВНИИГ им. Б.Е. Веденнева», 2016.

155. Кулаков И.Ю., Гайна К., Добрецов Н.Л., Василевский А.Н., Бушенкова Н.А. Реконструкции перемещений плит в арктическом регионе на основе комплексного анализа гравитационных, магнитных и сейсмических аномалий // Геология и геофизика, 2013, Т. 54, № 8. С. 1108-1125.

156. Курбацкий Е.Н., Баев Л.В. Спектры максимальных реакций (откликов) конструкций на сейсмические и техногенные динамические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2012. № 1. С. 37–42.

157. Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шипилов Э.В. Геодинамическая модель тектонического развития Арктики в мезозое и кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 1–32.

158. Левченко Д.Г., Кузин И.П., Сафонов М.В., Сычиков В.Н., Уломов И.В., Холопов Б.В. Опыт регистрации сейсмических сигналов с использованием широкополосных электрохимических сейсмоприемников // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45, № 4, с. 5-25.

159. Леденев В.В., Однолько В.Г. Анализ причин аварий зданий и сооружений и пути повышения их надежности // Вестник ТГТУ. 2012. Т. 18, № 2. Тамбов. С. 449-457.

160. Лисанов М. В., Сумской С.И., Савина А.В., Самусева Е.А. Аварийность на морских нефтегазовых объектах // Oil&Gas Journal Russia. 2010. № 5 (39). С. 48–53.

161. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Бах А.А., Кречетов Д.В. Об изменении значений собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС при различных уровнях наполнения водохранилища // В сборнике: Геофизические методы исследования земной коры Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырёва. 2014. С. 182-186.

162. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Брыксин А.А., Сигонин П.А., Коковкин И.В., Способ инженерно-сейсмического контроля над работами по гидравлическому разрыву пласта // В сборнике: Геофизические методы исследования земной коры Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырёва. 2014. С. 186-189.

163. Лобановский Ю.И. Технические причины катастрофы на Саяно-Шушенской ГЭС (итоги расследования). 2009. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.synerjetics.ru/article/catastrophe.htm (Дата обращения 10.05.2017).

164. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов Система контроля сейсмических воздействий. Общие технические требования. ОАО «АК «ТРАНСНЕФТЬ», 2012. 41 с.

165. Макаров В.И. О региональных особенностях новейшей геодинамики платформенных территорий в связи с оценкой их тектонической активности // Недра Поволжья и Прикаспия. Саратов: 1996, ноябрь, 1996 г., спец. вып. 13, с. 53-60.

166. Макаров В.И., Трифонов Ю.К., Щукин Ю.К. и др. Тектоническая расслоенность литосферы новейших подвижных поясов // Труды ГИН АН СССР, в. 359. М.: Наука, 1982.

167. Маловичко А.А., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А. Развитие систем геофизического мониторинга в Арктике // Арктика: экология и экономика. №2(14), 2014. Научный и информационно-аналитический журнал. С. 16–23.

168. Малышев Н.А., Никишин В.А., Никишин А.М., Обметко В.В., Мартиросян В.Н., Клещина Л.Н., Рейдик Ю.В. Новая модель геологического строения и история формирования Северо-Карского осадочного бассейна // ДАН, 2012. Т. 445. № 1. С. 50–54.

169. Марченков А.Ю., Капустян Н.К., Смирнов В.Б. Опыт регистрации сейсмического воздействия на высотное здание МГУ // Геофизические исследования. 2015.
 Т. 16. № 3. С. 31-42.

170. Марчук А.Н., Марчук Н.А. Плотины и геодинамика: опыт натурных наблюдений. М.: ИФЗ РАН, 2006. 156 с.

171. Марчук А.Н., Манько А.В. Тектонофизические аспекты напряженнодеформированного состояния больших бетонных плотин // Вестник МГСУ, 4, 2010. С. 99-105.

172. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Лебедев М.П., Аммосов А.П., Захарова М.И., Пермяков П.П., Глязнецова Ю.С., Лифшиц С.Х. Особенности возникновения чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне России и пути их парирования на основе концепции риска / Арктика: экология и экономика № 1 (13), 2014. С. 10–29.

173. Мегапроект «Ямал» [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.gazprom.ru/about/production/projects/mega-yamal/ (Дата обращения 28.01.2018).

174. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга и техногенных землетрясений горных ударов // Т.1 [В.Н. Опарин и др.], отв. Ред. Н.Н. Мельников, РАН, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела [и др.]. Новосибирск: СО РАН, 2009. 304 с.

175. Мехрюшев Д.Ю. Аппаратурные разработки Геофизической Службы РАН // Национальный отчет Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли Международного геодезического и геофизического союза 2003–2006. М.: НГК РАН, 2007. C.15–17.

176. Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Симпсон Д., Соболева О.В. Возбужденная сейсмичность в районе водохранилища Нурекской ГЭС // Душанбе: «Дониш», 1987. 402 с.

177. Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // Физика Земли. 2009. № 10. С. 49-68.

178. Миронов Е.У., Порубаев В.С. Формирование гряд торосов в прибрежной части Карского моря и их морфометрические характеристики // Современные проблемы науки и образования. № 4. 2012. Электронный ресурс – Режим доступа: <u>https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6707</u> (Дата обращения: 14.01.2018).

179. Мишаткин В.Н. Системы сейсмических наблюдений // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Кн.1 Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. С. 67-93.

180. Мкртычев О. В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях: монография / О. В. Мкртычев. Москва: МГСУ, 2010. 152 с. ISBN 978-5-7264-0508-7.

181. Морозов А.Н. Оценка возможностей региональной сейсмической сети по регистрации телесейсмических, региональных и локальных сейсмических событий (на примере архангельской сейсмической сети) // Автореф. диссерт. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 20 с.

182. Морозов А.Н. Ваганова Н.В. Годографы региональных волн Р и S для районов спрединговых хребтов Евро-Арктического региона // Вулканология и сейсмология, 2017, № 2, с. 59-67.

183. Морозов А.Н., Ваганова Н.В. Годографы сейсмических волн для Севера Русской плиты по данным Архангельской сейсмической сети // Разведка и охрана недр. 2011, №12. С. 48–51. ИФ РИНЦ 2012 0.142

184. Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Михайлова Я.А. Сейсмичность севера Русской плиты: уточнение параметров гипоцентров современных землетрясений // Физика Земли. №2. 2018.

185. Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Конечная Я.В. Тектонические землетрясения 22.10.2005 и 28.03.2013 гг. на севере Русской плиты // Физика Земли. № 4. 2016. С. 52-66.

186. Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Конечная Я.В. Новые данные о сейсмичности и скоростной структуре земной коры зоны перехода «континент-океан» в Баренцево-Карском регионе Арктики // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Девятой Межд. Сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 231-235.

187. Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Конечная Я.В. Сейсмичность северной акватории Баренцева моря в районе трогов Франц-Виктория и Орла // Геотектоника. Москва: Геологический Институт РАН, №3. 2014. С. 78-84.

188. МРДС 02-08 Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных. Первая редакция/ РОССТРОЙ. М., 2008.

189. Мурадов А.Н., Горбенко С.А., Остапенко В.Е. Неразрушающий контроль в обследованиях строительных конструкций зданий и сооружений. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>https://ardexpert.ru/article/5330</u> (Дата обращения 27.12.2017)

190. Мушкетов И.В., Орлов А.П. Каталог землетрясений в Российской империи. СПб., 1893. 582 с. (Записки Русского, геогр. о-ва. Т. 26).

191. Натурные испытания конструкций [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://lse.expert/naturnyye-ispytaniya-konstruktsiy (Дата обращения 27.12.2017).

192. Наумов А.К. Морфометрические характеристики ледяных образований Баренцева моря // Автореф. диссерт. на соискание уч. степени канд. географ. наук. С.-Петербург, 2010.

193. Научно-технический отчет по договору № 1010-223-74-2016/1-407-172 «Исследование и разработка методов дистанционного мониторинга состояния сооружений и режимов работы ГЭС». Этап 1. Анализ и рекомендации по применению имеющегося
опыта мониторинга состояния сооружений и режимов работы ГЭС. АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». 2017. 152 с.

194. Невзоров А.Л., Кубасов В.Н. Геологическая среда Архангельска и особенности ее взаимодействия с инженерными сооружениями // Геология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. № 2. 2001. С. 116-121.

195. Незаметдинов Э.У. Опыт ОРГРЭС по разработке и внедрению автоматизированных систем мониторинга и диагностирования технического состояния гидроагрегатов ГЭС // V Всероссийское совещание гидроэнергетиков. Санкт-Петербург, 2013.

196. Неразрушающие инструментальные методы исследования конструкций [Электронный pecypc] – Режим доступа: http://www.beton-karkas.ru/index.php/

197. Николаев А.В. Вибрационное просвечивание – метод исследования Земли // Проблемы вибрационного просвечивания Земли. М.: Наука, 1977. С. 5-14.

198. Николаев А.В. Изучение Земли невзрывными сейсмическими источниками // Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.: Наука, 1981. С. 29.

199. Николаев А.В. Развитие нетрадиционных методов в геофизике // Сб.
 «Физические основы сейсмического метода. Нетрадиционная геофизика», М., Наука. 1991.
 С. 5-17.

200. Николаев С.В. Высотные здания – это комплекс профессиональных решений // Жилищное строительство. 2005. № 9. С.2–10.

201. Николаев С.В., Капустян Н.К., Кальчук В.Г. Опыт исследования ветровых и сейсмических нагрузок в условиях высотного строительства г. Москвы // Будивельні конструкц., вып. 64, НДІБК. Киів, 2006. С. 61-64.

202. Николаев С.В., Острецов В.М. Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Катценбах Р., Сухин В.В. Инструментальный мониторинг конструкций и грунтов оснований высотных зданий // Современное высотное строительство. Монография ГУП «ИТЦ Москомархитерктуры», 2007. 464 с.

203. Николаев С.В., Острецов В.М., Гендельман Л.Б., Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Нестеркина М.А. Методы и результаты сейсмометрического мониторинга взаимодействия высотных зданий с грунтами оснований // Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан. М.: МГСУ, 2005. Ч. 1. С. 166–173.

204. Никонов А.А. Новый этап познания сейсмичности Восточно-Европейской платформы и ее обрамления // Доклады Академии наук. 2013. Т. 450. № 4. С. 465-469.

205. Никонов А.А. Исторические землетрясения // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Под ред. Н.В. Шарова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. С. 192-212.

206. Никонов А.А., Пономарева О.Н. Беломорское землетрясение 30 июня 1911 г. - новое рассмотрение // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т.35. №2. С.44-51.

207. Носкова Н.Н., Пономарева Н.Л. Землетрясение 28 января 2014 г. на Северном Урале // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Девятой Межд. Сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 262-265.

208. ОАО «НПО Промавтоматика» Автоматизированные системы. [Электронный pecypc] – Режим доступа: http://www.promavtomatika.com/catalogue/autosys/?lang=ru (Дата обращения 07.03.17).

209. Окулов В.Л. Резонансные гидроакустические процессы в проточной части машин и агрегатов с интенсивной закруткой потока // Автореф. дис. доктора физикоматематических наук. Рос. АН Сиб. отд-ние. Ин-т теплофизики. Новосибирск, 1993. 34 с.

210. Окулов В.Л., Пылев И.М. Неустойчивость напорных систем // Доклады Академии наук, Энергетика. 1995. Т. 341. № 4.

211. ООО «Эмерсон». Целевое развитие систем диагностики. Опыт реализации системы диагностики на гидроагрегатах №9 и №10 Нижнекамской ГЭС // Научно-практический семинар «Мониторинг вибрационного состояния гидроагрегатов: проблемы и пути решения», НП «Гидроэнергетика России», Москва, 2015.

212. Ордынская А.П. Интегральная оценка интенсивности проявлений землетрясений в природной среде и техносфере // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010. № 5. С. 45–53.

213. Острецов А.В., Вознюк А.Б., Капустян Н.К. Опыт мониторинга конструкций и грунтов оснований высотных зданий в Москве // Строительная наука и техника, №5 (20), 2008. С.99-101.

214. Острецов В.М., Гендельман Л.Б. и др. Способ определения истинных значений собственных частот колебаний зданий. Патент RU 2242026 C1, 15.01.2004.

215. Острецов В.М., Гендельман Л.Б., Дыховичная Н.А., Вознюк А.Б., Болдырев С.С., Капустян Н.К. Опыт тестирования состояния конструкций высотных зданий методом регистрации собственных колебаний// Железобетонные конструкции зданий большой этажности М.: МГСУ, 2004, С. 86–95.

216. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.

217. ОТТ СКСВ Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Система контроля сейсмических воздействий. Общие технические требования // ООО «НИИ ТНН», 2012. 41 с.

218. Отчет ЗАО «ВАЛДАЙГЕОЛОГИЯ» «Результаты региональных геологогеофизических работ в Мезенской синеклизе в 2000 – 2004 гг.» ФГУ ГНПП «СПЕЦГЕОФИЗИКА». М., 2004. 340 с.

219. Оценочный доклад «Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования» // Авторский коллектив. Редактор О.А. Анисимов. 2009. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <u>http://www.greenpeace.org/russia/ru/press/reports/4121202/</u> (Дата обращения 28.01.2018).

220. Панасенко Г.Д и др. Землетрясения Шпицбергена / Г.Д. Панасенко, Е.О. Кременецкая, З.И. Аранович. М.: Изд. МГК АН СССР, 1987. 81 с.

221. Панасенко Г.Д. Каталог землетрясений Кольского полуострова и Северной Карелии (с начала XVIII в. по 1955 г.). Кировск: Изд. КФ АН СССР. 1957. С. 31–35.

222. Панасенко Г.Д. Проблемы сейсмического районирования западного сектора советской Арктики // Сб. «Природа и хозяйство Севера». Вып. 14. Мурманск: Кн. изд-во, 1986. С. 4–6.

223. Панасенко Г.Д. Сейсмические особенности северо-востока Балтийского щита. Л.: Наука, 1969. 184 с.

224. Панов Л.В., Чирков Д.В. Численное моделирование кавитационных течений
 в гидротрубе в режимах частичной и полной загрузки. 2012. – [Электронный ресурс]. –
 Режим

http://conf.ict.nsc.ru/files/conferences/ym2012/fulltext/137888/139624/YM_2012_Panov_proc.p df (Дата обращения 10.05.2017)

225. Панов Л.В., Чирков Д.В., Черный С.Г. Численные алгоритмы моделирования кавитационных течений вязкой жидкости // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16. № 4. С. 96-113.

226. Патент 2140625 Российская Федерация, мпк G01M 7/00. Способ определения физического состояния зданий и сооружений / Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Барышев В.Г., Кузьменко А.П.; заявл. 17.02.1998; опубл. 27.10.1999 Бюл. № 17.

227. Патент 2150684 Российская Федерация, мпк G01M7/00, G01V1/00. Способ приведения к единому времени регистрации разновременных записей измерений / Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кузьменко А.П., Барышев В.Г., Сабуров В.С.; заявл. 26.08.1998; опубл. 10.06.2000

228. Патент 2151233 Российская Федерация, мпк E02B 1/02, G01M 7/00. Способ определения динамических характеристик основания и тела плотины гидротехнических сооружений / Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Барышев В.Г., Кузьменко А.П., Бах А.А.; заявл. 30.10.1998; опубл. 20.06.2000 Бюл. №17

229. Патент 2151234 Российская Федерация, мпк E02B 1/02, G01M 7/00. Способ определения динамических характеристик основания и тела плотины ГЭС под воздействием импульсов, возникающих при запуске гидроагрегатов / Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кузьменко А.П., Барышев В.Г., Сабуров В.С.; заявл. 25.11.1998; опубл. 20.06.2000

230. Патент 2163009 Российская Федерация, мпк G01M 7/02. Способ плановопредупредительного контроля физического состояния зданий и сооружений / Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кузьменко А.П., Барышев В.Г., Данилов И.А.; заявл. 01.06.1999; опубл. 10.02.2001 Бюл. №4

231. Патент 2242026 Российская Федерация, мпк G01V1/02. Способ определения истинных значений собственных частот колебаний зданий / Острецов В.М., Гендельман Л.Б., Вознюк А.Б., Болдырев С.С., Капустян Н.К.; заявл. 15.01.2004; опубл. 10.12.2004.

232. Патент 2242033 Российская Федерация, мпк G01V. Способ оценки и выбора участков территории для возведения сооружений различного назначения / Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Хореев В.С., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В.; опубл. 10.12.2004.

233. Патент 2365895 Российская Федерация, мпк G01M 19/00. Способ дистанционного контроля и диагностики состояния конструкций и оснований преимущественно инженерных сооружений / Острецов А.В., Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Сухин В.В., Таракановскй В.К., Янович А.А., Соколов В.В.; заявитель и патентообладатель Острецов А.В., Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Сухин В.В., Таракановски В.К., Янович А.А., Соколов В.В., Таракановски В.К., Янович А.А., Соколов В.В., Таракановски В.К., Янович А.А., Соколов В.В. 2008108720/28; заявл. 11.03.2008; опубл. 27.08.2009 Бюл. № 24.

234. Патент 2365896 Российская Федерация, мпк G01M19/00. Способ определения параметров физического состояния здания и/или сооружения / Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Басакина И.М., Янович А.А.; заявл. 08.04.2008; опубл. 27.08.2009.

235. Патент 2413193 Российская Федерация, мпк G01M 7/00. Способ мониторинга безопасности несущих конструкций, конструктивных элементов зданий и сооружений и система для его осуществления / Волков О.С., Клещин В.И.; заявитель и патентообладатель Волков О.С., Клещин В.И. – 2009110986/28; заявл. 26.03.2009; опубл. 27.02.2011 Бюл. №6

236. Патент 2461847 Российская Федерация, мпк G01V 1/28 G01M 7/02. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления / Селезнев В.С., Лисекин А.В., Брыксин А.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Геофизическая служба" – № 2010128394/28; заявл. 08.07.2010; опубл. 20.09.2012 Бюл. №26

237. Патент 2515130 Российская Федерация, мпк G01V 1/28 G01M 7/00. Сейсмометрический способ мониторинга технического состояния зданий и/или сооружений / Воробьева Д.Б., Золотухин Е.П.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт вычислительной техники Сибирского отделения Российской академии наук; заявл. 23.10.2012; опубл. 10.05.2014

238. Патент 2546056 Российская федерация, мпк G01M 7/00. Способ организации непрерывного сейсмического мониторинга инженерных сооружений и устройство для его осуществления / Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громыко П.В.; заявитель и патентообладатель ФГБУН Геофизическая служба Сибирского отделения Российской академии наук – №2013127923/28; заявл. 18.06.2013; опубл. 10.04.2015 Бюл. № 10.

239. Пашкин Е.М. Инженерная геология: Учебное пособие // М.: Архитектура, 2005. 264 с.

240. Плескач Н.К. Электроэнергетический сейсмический эффект // ДАН СССР,
1986. Т. 290. № 6. С. 1342-1346.

241. ПНАЭ Г-5-006-87 «Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций». М., 1987.

242. Положительное заключение государственной экспертизы № 162-13/ОГЭ 3162/04 (№ в реестре 00-1-4-0808-13). 2013.

243. Портативная цифровая компьютизированная сейсмологическая станция «ДИОГЕН-Х/24S» [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.ntkdiogen.ru/terra.html (Дата обращения: 04.01.2017)

244. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Министерство энергетики Российской федерации Утверждены 19.06.2003 № 229.

245. Преобразователь виброперемещений ИВП-05-0,8/200 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.tnlab.ru/ivp05.php (Дата обращения: 04.01.2017)

246. Пресс-служба ПАО «РусГидро» Итоги расследования осадки здания Загорской ГАЭС-2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://blog.rushydro.ru/?p=9150 (Дата обращения: 04.01.2018).

247. Причины техногенной катастрофы на Саяно-Шушенской ГЭС [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>http://www.contrtv.ru/events/3303/ (Д</u>ата обращения: 31.12.2017).

248. Проблемы геофизики XXI века: в 2 кн. // Отв. А. В. Николаев. М.: Наука, 2003. 311 с.

249. Промышленный сейсмический регистратор ZET 048-I (16 КАНАЛОВ) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>http://www.tdgears.ru/device/id39940.htm/ (Дата</u> обращения: 31.12.2017).

250. Пущаровский Д. Ю., Пущаровский Ю. М. Состав и строение мантии Земли // Соросовский образовательный журнал, 1998, № 11. С. 111-119.

251. РБ-006-98 Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ / НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России. М., 2000.

252. РД 34.20.501-95 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/250783/</u> (Дата обращения 28.12.2017)

253. РД 34.31.303-96 Методические указания по эксплуатационному контролю вибрационного состояния конструктивных узлов гидроагрегатов

254. РД 34.31.305-96 Методические указания по определению форм ротора и статора гидроагрегатов и оценки симметрии воздушных засоров.

255. Результаты региональных геолого-геофизических работ в Мезенской синеклизе в 2000–2004 гг. Отчет ЗАО «ВАЛДАЙГЕОЛОГИЯ», ФГУ ГНПП «СПЕЦГЕОФИЗИКА». 2004.

256. Ризниченко, Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.

257. Рогожин Е.А., Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Федоренко И.В. Об особенностях сейсмичности Евро-Арктического региона // ДАН 2016. Т. 467. № 5. С. 585-588.

258. Рогожин Е.А., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Современное состояние сейсмических наблюдений в районах размещения ответственных промышленных объектов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Девятой Межд. Сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 280-284.

259. Рогожин Е.А., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Конечная Я.В. Новая карта сейсмичности Европейского сектора Российской Арктики // Геотектоника. 2016. №3. С.19-25.

260. Рубин О.Д., Соболев В.Ю. Техническая реализация программно-аппаратного комплекса для мониторинга состояния и прогнозирования безопасности гидротехнических сооружений и их оснований // Природообустройство, № 1. 2017. С. 41-46.

261. Руководство по методике комплексного инженерно-сейсмометрического и сейсмологического мониторинга состояния конструкций зданий и сооружений, включая площадки из размещения / Под ред. Ф.Н. Юдахина. М.: ИФЗ РАН, 2011. 36 с.

262. Рыков А.В. Для чего нужны сейсмографы? – Электронный ресурс: <u>http://www.pereplet.ru/pops/rikov/rikov.html</u> Дата обращения (26.12.2017)

263. Рыкунов Л.Н., Смирнов В.Б. Сейсмология микромасштаба // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 3–15.

264. Савич А.И., Бронштейн В.И., Бовенко В.Г., Грошев М.Е., Гашин А.Н., Ильин М.М. Результаты динамических испытаний плотины Чиркейской ГЭС методом собственных малоамплитудных колебаний // Юбилейный сборник научных трудов Гидропроекта, 2000, Выпуск 159. С. 373-382.

265. Савич А.И., Куюнджич Б.Д., Коптев В.И. и др. Комплексные инженерногеофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений / Под ред. А.И. Савича и Б.Д. Куюнджича. М.: Недра, 1990. 463 с.

266. Садовский М.А. Прикладная сейсмология последних десятилетий века // Физика Земли. 1992. №2. С.10-22.

267. Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов Н.Г. Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1981. № 6. С.32–42.

268. Самые мощные землетрясения. Все сильнейшие землетрясения за историю наблюдений // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>http://www.vigivanie.com/vigivanie-pri-zemletryasenii/1625-vse-zemletryaseniya.html</u> (Дата обращения 13.01.2018).

269. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1979. 190 с.

270. Сейсмический контроль и геодинамика среды района водохранилища Нурекской ГЭС // Отв. ред. С.Х. Негматуллаев. Часть І. Душанбе: Дониш, 1990. 162 с.

271. Сейсмологические исследования в арктических и приарктических регионах / Под. ред. Ф.Н. Юдахина. Екатеринбург: УрО РАН. 2011. 244 с.

272. Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М., Лисейкин А.В., Брыксин А.А. Наносейсмология: основные направления исследований // Проблемы комплексного геофизического мониторинга дальнего востока России / Труды Пятой научно-технической

конференции: К 100-летию организации инструментальных сейсмологических наблюдений на Камчатке. Обнинск: Изд. ФИЦ ЕГС РАН, 2015, с. 252-256.

273. Селезнев В.С., Кузьменко А.П., Еманов А.Ф., Сабуров В.А., Барышев В.Г., Данилов И.А., Бах А.А. Возможности и результаты инженерно-сейсмологического обследования зданий и сооружений // Методы изучения, строение и мониторинг литосферы, СО РАН, Новосибирск. 1998. С. 98-104.

274. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Громыко П.В. Были ли повышенные колебания второго гидроагрегата до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 г.? // Гидротехническое строительство. 2012. № 10. С.48–50.

275. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Ефимов А.С., Сальников А.С., Чичинин И.С., Кашун В.Н., Романенко И.Е., Елагин С.А., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е., Сережников Н.А., Максимов М.А., Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем Востоке России // Проблемы информатики, 2013, №3, с.30-41

276. Сим Л.А., Жиров Д.В., Маринин А.В. Реконструкция напряженнодеформированного состояния восточной части Балтийского щита // Геодинамика и тектонофизика. 2011. № 3. С. 219-243.

277. Смирнов В.Б. Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений // Вулканология и сейсмология. № 4. 1997. С. 93-105.

278. Смирнов В.И., Вахрина Г.Н. Развитие моделей расчетных акселерограмм сейсмических воздействий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. № 4. С. 26–34.

279. СНиП 22-02-2003 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения / Госстрой России. М.: ПНИИИС Госстроя России, 2004

280. СО 153-34.20.501-2003. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации // Госэнергонадзор Минэнерго России. 2003. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.complexdoc.ru/ntd/550226

281. Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Моделирование сейсмических полей в геофизической среде с учетом наличия локальных резонансных структур // Геофизика на рубеже веков. М.: Изд. ФЦНТП России, 1999. С. 170-193.

282. Соболев Г.А., Васильев В.Ю. Особенности группирования эпицентров слабых толчков перед сильными землетрясениями Кавказа // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. N 4. C.24-36.

283. Современные методы гидроизоляции [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>http://stroyrubrika.ru/sovremennye-metody-gidroizolyacii.html</u> (Дата обращения 31.12.2017)

284. Сорохтин Н.О., Никифоров С.Л., Кошель С.М., Козлов Н.Е. Геодинамическая эволюция и морфоструктурный анализ западной части арктического шельфа России // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19. № 1/1. С. 123–137.

285. Сотников С.Н., Симагин В.Г., Вершинин В.П. Проектирование и возведение фундаментов вблизи существующих сооружений: (Опыт строительства в условиях Северо-Запада СССР) / Под ред. С. Н. Сотникова. М.: Стройиздат, 1986. 96 с.

286. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерногеологических процессов/Госстрой России. М.: ПНИИИС Госстроя России, 2000.

287. СП 13-102-2003 Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М.: Госстрой России, 2003. 32 с.

288. СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. М., 2015. 132 с.

289. СП 15.13330.2012 Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81* (с Изменениями N 1, 2)

290. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*

291. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88

292. СП 42.13330.2011 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89* (с Поправкой)

293. Спунгин В.Г., Дубиня В.А., Иванченко Г.Н. Экспрессная диагностика структуры и геодинамика массива горных пород на основе анализа микросейсмических колебаний // Вулканология и сейсмология. № 6, М.: 1997.1. С.42-50.

294. СТО «РусГидро» 02.01.059-2011 (СТО 70238424.27.140.023-2010) Мониторинг технического состояния основного оборудования. Нормы и требования.

295. СТО «РусГидро» 02.03.70-2011 Гидротурбины. Общие технические условия на капитальный ремонт. Нормы и требования

296. СТО 1.1.1.03.001.0868-2012. Мониторинг сейсмологических условий районов размещения атомных станций. Стандарт организации М., 2012. 44 с.

297. СТО 70238424.27.140.001-2011 (СТО 17330282.27.140.001–2006) Гидроэлектростанции. Методики оценки технического состояния основного оборудования.

298. СТО 70238424.27.140.005-2010 (СТО 17330282.27.140.005-2008) Гидротурбинные установки. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования.

299. СТО 70238424.27.140.006-2010 (СТО 17330282.27.140.006-2008) Гидрогенераторы. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования.

300. СТО 70238424.27.140.009-2010 (СТО 17330282.27.140.009-2008) Автоматизированные системы управления технологическими процессами ГЭС и ГАЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования.

301. СТО 70238424.27.140.015-2010 (СТО 17330282.27.140.015-2008) Гидроэлектростанции. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования

302. СТО 70238424.27.140.023-2010 Гидроэлектростанции. Мониторинг технического состояния основного оборудования. Нормы и требования

303. СТО 70238424.27.140.032-2009. Гидроэлектростанции в зонах с высокой сейсмической активностью геодинамический мониторинг гидротехнических сооружений. Нормы и требования [Текст]: нормативно-технический материал. М.: НП "ИНВЕЛ", 2009. 59 с.

304. СТО 70238424.27.140.034-2009 Гидроэлектростанции. Оценка сейсмостойкости оборудования. Нормы и требования

305. СТО 7028424.27.140.032-2009 Гидроэлектростанции в зонах с высокой сейсмической активностью. Геодинамический мониторинг гидротехнических сооружений. Нормы и требования.

306. СТО 95 103 – 2013. Руководство по методике комплексного инженерносейсмометрического и сейсмологического мониторинга состояния конструкций зданий и сооружений, включая площадки их размещения. М.: СРО НП "СОЮЗАТОМГЕО", 2013. 40 с.

307. СТО Газпром 2-3.7-576-2011. Проектирование, строительство и эксплуатация подводных добычных систем. Газпром ВНИИГАЗ, 2012.

308. СТО 70238424.27.140.032-2009 Гидроэлектростанции в зонах с высокой сейсмической активностью. Геодинамический мониторинг гидротехнических сооружений. Нормы и требования. М., 2009.

309. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года // [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.youngscience.ru/pages/main/documents/5124/11484/index.shtml (Дата обращения 29.01.2015).

310. Строительство на вечной мерзлоте – потенциал в два триллиона долларов США [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>https://ardexpert.ru/article/3903</u> (Дата обращения 14.01.2018).

311. Ступакова А.В. Структура и нефтегазоносность Баренцево-Карского шельфа и прилегающих территорий // Геология нефти и газа. 2011. № 6. С. 99-115.

312. Сухин В.В., Ламперти Р. Мониторинг строительного объекта - это необходимость им требование времени // Уникальные и специальные технологии в строительстве. М.: «Дом на Брестской», 2005. С. 72-73.

313. Таракановский В.К., Капустян Н.К., Климов А.Н. Инструменты и возможности мониторинга процессов в грунтах основания высотных зданий в Москве // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. М., 2010. № 6. С. 551–562.

314. Тарасов В.Н. Вибрация и динамическая устойчивость гидроагрегатов [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.diamech.ru/files/dinamicheskaya_ustoichivost_gidroagregatov.pdf (Дата обращения 08.11.2016).

315. Ташлыкова Т.А. Триггерные эффекты активизации сейсмичности при заполнении и эксплуатации водохранилищ Ангарского каскада // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ИДГ РАН, 2010. С. 97-98.

316. Терехин С.Н., Кузнецов Р.Г., Филиппов А.Г. Проблемы реализации и внедрения систем мониторинга потенциально опасных объектов // Безопасность критически важных и потенциально опасных объектов / http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V4/1.pdf.

317. Тетельмин В.В. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС: состояние, процессы, прогноз / В. В. Тетельмин. М.: URSS: ЛИБРОКОМ, 2011. 234 с.

318. Техническая политика ОАО «РусГидро». Утверждено Решением Совета директоров ОАО «РусГидро» 02.09.2011 Протокол № 133.

319. Типы систем автономного энергоснабжения: преимущества и недостатки [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://tok-shop.ru/auxpage_tipy-sistem-avtonomnogo-energosnabzhenija/ (Дата обращения 18.06.2013).

320. Троицкий П.А. Квазигармонический сигнал от Нурекской ГЭС на Гармском полигоне // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1980. №9. С. 118-128

321. Труды ААНИИ. Карское море [Электронный ресурс] – Режим доступа:http://www.aari.ru/resources/a0013_17/kara/Atlas_Kara_Sea_Winter/text/rejim.htm#p9 (Дата обращения 14.01.2018).

322. Трунин Е.С., Скворцов О.Б. Эксплуатационный контроль технического состояния гидроагрегатов // Электрические станции – ежемесячный производственнотехнический журнал. Вып. 6. Энергопрогресс, 2010. С. 38-45.

323. ТУ 4314-04-00129716-05. Комплексы сейсмометрических наблюдений измерительные КСНИ-ВНИИГ. Внесено в Реестр средств измерения №31901-06, 2006 / http://www.tdgears.ru/device/id17774.htm

324. ТУ 4314-71332728-003-2013. Удаленный регистратор сейсмических сигналов ADAS3. Технические условия. 2013. 23 с.

325. Уломов В.И. Инструментальные наблюдения сейсмических проявлений Восточно-Карпатских землетрясений на территории Москвы // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. № 3. С. 34–42.

326. Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г., Гусев А.А., Гусев Г.С., Акатова К.Н., Аптикаев Ф.Ф., Данилова Т.И., Кожурин А.И., Медведева Н.С., Никонов А.А., Перетокин С.А., Пустовитенко Б.Г., Стром А.Л. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // Гл. редакторы: д. ф.-м. н. проф. В.И. Уломов, к. г.-м. н. М.И. Богданов

327. Федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <u>http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/</u> (Дата обращения 20.12.2017)

328. Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании»

329. Физические методы испытания материалов и конструкций [Электронный pecypc] – Режим доступа: <u>http://mydocx.ru/1-109241.html</u> (Дата обращения 31.12.2017)

330. Французова В.И., Ваганова Н.В. Обобщение результатов мониторинга, проводимого Архангельской сетью сейсмических станций // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Второй Международной Сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2007. С. 189–193.

331. Французова В.И., Ваганова Н.В., Юдахин Ф.Н., Винник Л.П., Косарев Г.Л., Орешин С.И. Строение литосферы по данным обменных волн под сейсмостанцией Климовская // Вестник Воронежского государственного университета. Серия геология. 2011, № 1. С 176–183. ИФ РИНЦ 2012 0.034

332. Французова В.И., Конечная Я.В., Ваганова Н.В. 10-летие Архангельской сети: мониторинг естественной сейсмичности // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной Сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2012. С. 324–328.

333. Французова В.И., Конечная Я.В., Ваганова H.B. Результаты сейсмомониторинга, проводимого Архангельской сетью станций // Современные методы данных. обработки И интерпретации сейсмологических Материалы Четвертой Международной Сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2009. С. 205-210.

334. Французова В.И., Конечная Я.В., Иванова Е.В. Регистрация сейсмических событий заполярной станцией «Амдерма» в составе Архангельской сети // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Восьмой Межд. Сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 332–336.

335. Храпков А.А., Егоров А.Ю., Злобин Д.Н., Никифоров А.А., Скоморовская Е.Я, Харитонов М.В. Опыт эксплуатации и перспективы развития автоматизированной системы сейсмометрического контроля на Бурейской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2010, Т. 257, с. 36-42.

336. Храпков А.А., Егоров А.Ю., Злобин Д.Н., Никифоров А.А., Скоморовская Е.Я, Харитонов М.В. О новых возможностях автоматизированной системы сейсмометрического контроля Бурейской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2012, Т. 266, с. 3-12.

337. Храпков А.А., Иванов И.В., Левелев А.Г., Дашевская Е.Н., Соловцов Д.Г., Яковлев И.В. Опытно-промышленный образец комплекса инженерно-сейсмометрических наблюдений // Гидротехническое строительство, 1995, № 2, с. 21-28.

338. Храпков А.А., Никифоров А.А., Скоморовская Е.Я., Гаркин А.С. Автоматизированная система сейсмометрического контроля на Бурейской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. 2007. Т.249. С. 32-38.

339. Хуторской М.Д., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Кременецкая Е.О., Кваерна Т. Сейсмичность, тепловой поток и тектоника Западно-Арктического бассейна // Научно-технический журнал «Мониторинг. Наука и технологии». № 3(24) 2015. С. 6-15.

340. Хуторской М.Д., Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В. и др. Геотермия арктических морей. М.: ГЕОС, 2013. 232 с.

341. Цейтлин Я.И., Смолий Н.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. Москва: Недра, 1981. 192 с.

342. Шаблинский Г.Э. Мониторинг уникальных высотных зданий и сооружений на динамические и сейсмические воздействия. / Научное издание - М.: Издательство АСВ, 2013. – 328 с. – ISBN 978-5-93093-968-2.

343. Шаблинский Г.Э., Зубков Д.А. Натуральные динамические исследования строительных конструкций жилых и общественных зданий. М.: Ассоциация строительных вузов (АСВ) 2009. 216 с.

344. Шапиро Г.А. Вибрационные испытания зданий. М.: Стройиздат, 1972.

345. Шахраманьян М.А., Нигметов Г.М. и др. Способ динамических испытаний зданий. Патент РФ № 2141635, G01M7/00. 1999.

346. Шибаев С.В., Козьмин Б.М., Петров А.Ф., Тимиршин К.В. Сейсмологические исследования в Республике Саха (Якутия) // Развитие систем сейсмологического и геофизического мониторинга природных и техногенных процессов на территории Северной Евразии. Материалы Межд. конференции, посвященной 50-летию открытия Центральной геофизической обсерватории в г. Обниниске / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 75.

347. Эриксон К., Эриксон С. Система контроля гидравлических машин // Гидроэлектростанции, 1992, №1.

348. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 156 с.

349. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Выявление слабоактивных разломов платформ с использованием сейсмической нанотехнологии // ДАН, 2005. Т. 405. № 4. С. 533-538.

350. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Шахова Е.В. Исследование активности платформенных территорий с использованием микросейсм. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 132 с.

351. Юдахин Ф.Н., Старовойт О.Е., Французова В.И., Мехрюшев Д.Ю. Создание Архангельской сейсмической сети // Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде Северных регионов: материалы Всерос. конф. с междунар. участием. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. Т. 2. С. 414–418.

352. Юдахин Ф.Н., Французова В.И. О необходимости создания сети сейсмического мониторинга в северных регионах России // Екатеринбург: Журнал «Вестник УрО РАН», № 2(16), 2006. С.25-35.

353. Юдахин Ф.Н., Французова В.И. Проблемы сейсмомониторинга арктических и приарктических территорий России // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47, № 4. С. 23-33.

354. Юдахин Ф.Н., Французова В.И. Сейсмичность Архангельской области // Землетрясения Северной Евразии в 1995г. М.: ГС РАН, 2001. С. 128-139.

355. Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 299 с. ISBN 5-7691-1431-2.

356. Adams R.D., Asghar Ahmed. Seismic effects at Mangla Dam. Nature. 1969. V. 222. P. 1153-1155.

357. Afonin N., Kozlovskaya E., Kukkonen I. and DAFNE/FINLAND Working Group: Structure of the Suasselkä postglacial fault in northern Finland obtained by analysis of local events and ambient seismic noise. Solid Earth, 8, 2017, pp. 531-544, doi:10.5194/se-8-531-2017.

358. Al-Husseini, M.I., Glover, J.B., Barley, B.J., 1981. Dispersion patterns of the ground roll in eastern Saudi Arabia, *Geophysics*, 46(2), pp. 121-137.

359. Almendros J., Ib6cez J.M., Alguacil G., and Del Pezzo E. (1999). Array analysis using circular-wave-front geometry: an application to locate the nearby seismo-volcanic source. Geophys. J. Int., 136. Pp. 159-170.

360.Andritz.Monitoring and diagnosis // [Электронный pecypc]URL:http://www.andritz.com/index/hydro/hy-others-andritz-hydro/pf-detail?productid=8441(датаобращения 07.03.17)

361. Antonovskaya G., Kapustian N., Moshkunov K., Dubinskiy S. The enhanced seismic surveillance system for Chirkey dam safety (Caucasus, Russia) ICOLD 2017.

362. Antonovskaya G., Kapustian N., Ngo Thi Lu Seismic engineering investigation of hydropower station dams // 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul avg. 25-29, 2014. pp. 223-233.

363. Antonovskaya G., Konechnaya Ya., Kremenetskaya E., Asming V., Kvaerna T., Schweitzer J., Ringdal F. Enhanced Earthquake Monitorin European Arctic // Polar Sciense. 2015. Vol. 9, Issue 1. P. 158–167.

364. Antonovskaya G.N., Kapustyan N.K., Moshkunov A.I., Danilov A.V. Seismic network solution for HPP turbine operation monitoring. International Journal on Hydropower & Dams. Issue 6. 2016. Pp. 52-56.

365. Arctic Petroleum Geology / Spencer, A.M., Embry, A.F., Gautier, D.L., Stoupakova, A.V. & Sørensen, K. (eds). Geological Society Memoir No. 35. Published by the Geological Society, London. 2011.

366. Artyushkov E.V., Belyaev I.V., Kazanin G.S., Pavlov S.P., Chekhovich P.A., Shkarubo S.I. Formation mechanisms of ultradeep sedimentary basins: The North Barents basin.

Petroleum potential implications // Russian Geology and Geophysics. 2014. Vol. 55. № 5-6. P. 649–667.

367. Asming, V., Prokudina, A. (2016) System for automatic detection and location of seismic events for arbitrary seismic station configuration NSDL. ESC 2016-373, 35th General Assembly of the European Seismological Commission.

368. Båth M. An earthquake catalogue for Fennoscandia for the years 1891-1950 // Sver. Geol. Unders., ser.C. No. 545. Stockholm, 1956.

369. Bolt B. A. (1976). Nuclear Explosions and Earthquakes: The Parted Veil. W. H. Freeman, San Francisco, 309 pp.

370. Bungum H., Risbo J., Hjortenberg E. 1977. Precise continuous monitoring of seismic velocity variations and their possible connection to solid Earth tides, J. Geoph. Res., v. 82, N. 33, p. 5365-5373.

371. Bykov Yu.A., Orehov G.V., Churin P.S. The calculation of the flow in the flow path of the high-pressure Francis hydro turbine with locked wheel // Internet-journal "Naukovedenie" 2014, 2 (21) P. 1–15 http://naukovedenie.ru 178TVN214.

372. Calcina S.V., Eltrudis L., Piroddi L., Ranieri G., Ambient Vibration Tests of an Arch Dam with Different Reservoir Water Levels: Experimental Results and Comparison with Finite Element Modelling // The Scientific World Journal Volume 2014, Article ID 692709, 12 pages. Hindawi Publishing Corporation.

373. Capon J. (1969b). Investigation of long-period noise at the large aperture seismic array. J. Geophys. Res., 12, 3182-3194.

374. Carder D.S. (1936). Vibration Observations, Chapter 5 in Earthquake Investigations in California 1934-1935. U.S. Dept. of Commerce, Coast and Geologic Servey, Special Publication № 201. Washington, D.C. U.S.A.

375. Casoli P, Vacca A & Franzioni G (2005). A numerical model for the simulation of external gear pumps. The six JFPS international symposium on fluid power, Tsukuba, Japan, pp 151-160.

376. Castellaro S., Padrón L.A. and Mulargia F. The different response of apparently identical structures: a far-field lesson from the Mirandola 20th May 2012 earthquake // Bulletin of Earthquake Engineering, 2013.

377. Cessaro R.K (1994). Sources of primary and secondary microseisms. Bull. Seism. Soc. Am., 84. Pp. 142–148.

378. Chanson, H. Application of the Method of Characteristics to the Dam Break Wave Problem // Journal of Hydraulic Research, IAHR, 2009. Vol. 47, No. 1, pp. 41-49.

379. Chanson, H. Environmental Hydraulics of open channel flows. Elsevier Butterworth-Heinemann. 2004. 430 p.

380. Cheng, F., Xia, J., Luo, Y., Xu, Z., Wang, L., Shen, C., Liu, R., PanY., Mi, B. and Hu Y, 2016. Multichannel analysis of passive surface waves based on cross correlations, Geophysics, 81(5), pp. 1-10. DOI: 10.1190/geo2015-0505.1

381. Chouet, B. (1996). New methods and future trends in seismological volcano monitoring. In: Scarpa, R., and Tilling, R. (eds.). Monitoring and mitigation of volcano hazards, Berlin, Springer-Verlag, 1996. ISBN 3-540-60713-7, 23-97.

382. Chuhan Z., Jianwen P., Jinting W. (2009) Influence of seismic input mechanisms and radiation damping on arch dam response. Soil Dyn Earthq Eng 29(9):1282–1293. doi: 10.1016/j.soildyn.2009.03.003

383. Daniell W.E., Taylor C.A. (1999) Effective ambient vibration testing for validating numerical models of concrete dams. Earthq Eng Struct Dyn 28(11): 1327–1344.

384. Darbre G.R. Strong-motion instrumentation of dams // Earthquake Engineering And Structural Dynamics, vol. 24. 1995, pp. 1101-1111.

385. Darbre G.R., Proulx J. (2002) Continuous ambient-vibration monitoring of the arch dam of Mauvoisin. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 31(2):475–480.

386. Davies J. H. & Davies D. R. Earth's surface heat flux // Solid Earth. 2010. Vol. 1.P. 5–24.

387. Dekterev A.A., Minakov A.V., Platonov D.V., Zakharov A.V., Pylev I.M. Mathematical modeling of low-frequency pressure fluctuations in hydroturbine ducts // Fluid Dynamics, 2015, № 5, T. 50. P. 601–612.

388. Demuth A., Ottemöller L., Keers H. Ambient noise levels and detection threshold in Norway. Journal of Seismology. 2016; 20(3): 889–904. Doi: 10.1007/s10950-016-9566-8

389. Douze, E.J., Laster, S.J., 1979. Seismic array noise studies at Roosevelt Hot Springs, Utah geothermal area, *Geophysics*, 44(9), pp. 1570-1583.

390. Draganov, D. et al., 2009. Reflection images from ambient seismic noise, Geophysics, 74(5), pp. A63-A67.

391. Edwards MH, Kurras GJ, Tolstoy M, Bohnenstiehl DR, Coakley BJ, Cochran JR. Evidence of recent volcanic activity on the ultraslow-spreading Gakkel ridge. Nature. 2001 Feb 15;409(6822):808-12. DOI: 10.1038/35057258

392. Essen H.H., Krüger F., Dahm T., Grevemeyer I. (2003). On the generation of secondary microseism observed in north and central Europe. J. Geophys. Res., 108, B10, ESE 15, 15 pp., doi: 10.1029/2002JB002318.

393. Evangelatos J. & David C. Mosher. Seismic stratigraphy, structure and morphology of Makarov Basin and surrounding regions: tectonic implications. Marine Geology 374 (2016) 1–13. <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2016.01.013</u>.

394. Fenves G.L., Mojtahedi S., Reimer R.B. (1992) Effect of contraction joints on earthquake response of an arch dam. J Struct Eng 18(4):1039–1055. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:4(1039)

395. Frantti G.E. The nature of high frequency noise spectra, Geophysics, 1963. V. 28, N 4. Pp. 547-562.

396. Friedrich A., Krüger F., Klinge K. (1998). Ocean generated microseismic noise located with the Grдfenberg array. J. Seism., 2. Pp. 47-64.

397. Furumoto, M., Kunitomo, T., Inoue, H., Yamada, I., Yamaoka, K., Ikami, A., and Fukao, Y. (1990). Twin Sources of High-Frequency Volcanic Tremor of Izu-Oshima Volcano. Japan. Geophys. Res. Lett., 17, 25-27.

398. Gabriels, P., Snieder, R., Nolet, G., 1987. In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves, Geophysical prospecting, 35(2), pp. 187-196.

399. Gahalaut K., Gahalaut V.K. and Pandey M.R. A new case of reservoir triggered seismicity: Govind Ballav Pant reservoir (Rihand dam), central India. Tectonophisics. 2007. V. 439, N (1-4). P. 171-178.

400. Gaina, C., Gernigon, L. & Ball, P. 2009. PalaeoceneRecent plate boundaries in the NE Atlantic and the formation of the Jan Mayen microcontinent. Journal of the Geological Society, 166, 601–616, https://doi.org/10.1144/0016-76492008-112

401. Gaina, C., Werner, S.C., Saltus, R. & Maus, S. 2011. Circum-Arctic mapping project: new magnetic and gravity anomaly maps of the Arctic. In: Spencer, A.M., Embry, A.F., Gautier, D.L., Stoupakova, A.V. & Sørensen, K. (eds) Arctic Petroleum Geology. Geological Society, London, Memoirs, 35, 39–48, https://doi.org/10.1144/M35.3

402. Gallipoli M.R., Mucciarelli M., and Vona M. Empirical estimate of fundamental frequencies and damping for Italian buildings // Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 38, no. 8, pp. 973–988, 2009.

403. Geometrics, http://www.geometrics.com/ Accessed August 29, 2017

404. GeoSIG, https://www.geosig.com/ Accessed August 29, 2017

405. Geosignal, www.geosignal.ru Accessed August 29, 2017.

406. Gomberg J., Beeler N., Blanpied M. On rate-state and Coulomb failure models // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2000. Vol. 105. P. 7857–7872.

407. Goodeve T.E., Pollock G.B., Bissonnette M.R. Predictive maintenance tool for hydro unit condition monitoring, Hydropower&Dams. July, 1994.

408. Graizer V. The Response to Complex Ground Motions of Seismometers with Galperin Sensor Configuration. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, No. 2B, pp. 1366–1377, May 2009, doi: 10.1785/0120080174

409. Gupta H.K. The present status of reservoir induced seismicity investigations with special emphasis on Koyna earthquakes. 1985. Tectonophysics. Vol. 44, № 3-4. P.257-279.

410. Gupta H.K., Rastogi B.K., Mohan J. 1982. Studies of reservoir induced seismicity and earthquakes in Peninsular India, Geoph. Res. v. 20, N 3 (special ussie), pp. 127-139.

411. Gupta H.K. (2002) A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. Earth Sci Rev 58: 279–310.

412. Gupta H.K., Rastogi B.K. (2013) Dams and earthquakes. In developments in geotechnical engineering 11. Elsevier, 246 p. ISBN 0444600558, 9780444600554

413. Guralp Systems. URL: http://www.guralp.com/ (дата обращения 18.08.2014)

414. Havskov J., Alguacil G. Istrumentation in Earthquake Seismology. Springer. 2004.313 p.

415. Hjelstuen, B., Eldholm, O., and Faleide, J. (2007) Recurrent Pleistocene megafailures on the SW Barents Sea margin. Earth and Planetary Science Letters. V. 258. Issues 4-3, 30 June 2007, pp. 605–618.

416. Honam High-Speed Railway, South Korea: https://www.geosig.com/Earthquake-Early-Warning-pg33.aspx. Accessed 28.01.2018.

417. Hudson D.E. (1970). Dynamic Tests of Full-Scale Structures, in Earthquake Engineering (ed. by R.L. Wiegel). Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.

418. Husebye E.S., Ruud B.O. Eight – Array Seismology – Past, Present and Future Developments //

http://publishing.cdlib.org/ucpressebooks/view?docId=ft7m3nb4pj;chunk.id=d0e6465;doc.view= print

419. Ibrahim S.R., Mikulcik E.C. (1977) A method for the direct identification of vibration parameters from the free response. In the shock and vibration inform. Ctr Shock and Vibration Bull 4: 183–198 (SEE N80-70092 01-31)

420. International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology. Part A. Volume 81A. 1st Edition. Editors: William Lee Paul Jennings Carl Kisslinger Hiroo Kanamori. Copyright 2002 by the Int'l Assoc. Seismol. & Phys. Earth's Interior Committee on Education. https://igppweb.ucsd.edu/~agnew/Pubs/agnew.a66.pdf (Дата обращения 26.12.2017) 421. International Seismological Centre (ISC) [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.isc.ac.uk/ (дата обращения: 15.11.17 г.).

422. ISO 10816-5:2000 Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants

423. ISO 7919-5:2005 Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants.

424. Ivanovic, S.S., Trifunac, M.D., Todorovska, M.I. Ambient Vibration Test of Structures – a Review. ISET Journal of Earthquake Technology, Paper № 407, Vol. 37, № 4. December 2000, pp. 165-197.

425. Jasbinsek, J.J., Dueker, K.G., Hansen, S.M., 2010. Characterizing the 410-km discontinuity low-velocity layer beneath LA RISTRA array in the north American southwest // Geochemistry Geophysics Geosystems 11 (3), Q03008. doi:10.1029/2009GC002836.

426. Juang J., Minh N., Phan Q. Identification and Control of Mechanical Systems. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2006.

427. Kapustian N., Antonovskaya G., Agafonov V., Neumoin K., Safonov M. Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow // Seismic Behavior of Irregular and Complex Structures // Geotechnical, geological and Earthquake Engineering v. 24 // O. Lavan, M. DeStefano. Springer. XIV. 2013. Pp. 353–363.

428. Kato T., Honda T., Kawato S. The seismic analysis of an earth-fill dam on thick liquefiable ground and countermeasures against a large earthquake // International Symposium on «Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries» Johannesburg, South Africa, 18 May 2016. © SANCOLD, ISBN 978-0-620-71042-8.

429. Kirkegaard P.H., Brincker R. (1994) On the optimal location of sensors for parametric identification of linear structural systems. Mech Syst Signal Process 8(6):639–647. doi:10.1006/mssp.1994.1045

430. Kremenetskaya E., Asming V., Ringdal F. Seismic location calibration of the European Arctic // Pure and Applied Geophysics. 2001. Vol. 158. № 1–2. C. 117–128.

431. Kvaerna T., & Ringdal F. Generalized beamforming, phase association and threshold monitoring using a global seismic network. In Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty. Springer Netherlands. 1996, pp. 447-466.

432. Lacasse S. Ninth OTRC Honors Lecture; Geotechnical contributions to offshore development. 1999. Proc. Offshore Technology Conference, Huston.

433. Lacoss R.T., Kelly E.J., Toksöz, and M. N. (1969). Estimation of seismic noise structure using arrays. Geophysics, 34. Pp. 21-38.

434. Le Feuvre M. et al., 2015. Passive multi-channel analysis of surface waves with cross-correlations and beamforming. Application to a sea dike, *Journal of Applied Geophysics*, *114*, pp. 36-51.

435. Le Huy Minh (Project manager), 2017. Study of Seimotectonic effect to stability of Tranh River, No.2 Hydroelectric Plant, North Tra My district, Quang Nam province, Code: DTDL.2012-G/57

436. Lebedev, S., A. J. Schaeffer, J. Fullea, V. Pease, Seismic tomography of the Arctic region: Inferences for the thermal structure and evolution of the lithosphere. In Pease, V. & Coakley, B. (eds.) Circum-Arctic Lithosphere Evolution. Geological Society, London, Special Publications, 460, https://doi.org/10.1144/SP460.10, 2017.

437. Liszka L. Long-distance propagation of infrasound from artificial sources, Journ. Acoust. Soc. Am., v.56, No 5, 1974. Pp.1383-1388.

438. Loh C.H., Tsu-Shiu W. (1996) Identification of Fei-Tsui arch dam from both ambient and seismic response data. Soil Dyn Earthq Eng 15(7):465–483. doi:10.1016/0267-7261(96)00016-4

439. Malyshev, N.A., Nikishin, V.A., Nikishin, A.M., Obmetko, V.V., Martirosyan, V.N., Kleshchina, L.N. & Reydik, YU.V. 2012. A new model of the geological structure and evolution of the North Kara Sedimentary Basin. Dokladdy Earth Science, 445, 791–795.

440. Mäntyniemi P., Tatevossian R.E., Tatevossian T.N. How to deal with sparse macroseismic data: Reflections on earthquake records and recollections in the Eastern Baltic Shield // Annals of geophysics. 2011. 54(3). Pp. 305-313. doi: 10.4401/ag-4786

441. Mari, J.L., 1984. Estimation of static corrections for shear-wave profiling using the dispersion properties of Love waves, *Geophysics*, *49*(*8*), pp. 1169-1179.

442. Mivehchi M.R., Ahmadi M.T., Hajmomeni A. (2003) Effective techniques for arch dam ambient vibration test: application on two Iranian dams. JSEE 5(2):23–34

443. Morozov A.N., Asming V.E., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V., Mikhaylova Y.A., Evtyugina Z.A. Seismicity of the Novaya Zemlya archipelago: relocated event catalog from 1974 to 2014 // Journal of Seismology. 21(6), 2017. Pp. 1439-1466. DOI 10.1007/s10950-017-9676-y

444. Morozov A.N., Vaganova N.V., Ivanova E.V., Konechnaya Y.V., Fedorenko I.V., Mikhaylova Y.A. New data about small-magnitude earthquakes of the ultraslow-spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // Journal of Geodynamic. 2016. Vol. 93, C. pp. 31-41. 445. Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V., Asming V.E. New data about seismicity and crustal velocity structure of the "continent-ocean" transition zone of the Barents-Kara region in the Arctic // Journal of Seismology. January 2015, Volume 19, Issue 1, pp. 219–230.

446. Nanometrics, <u>http://www.nanometrics.ca</u> Accessed August 29, 2017

447. Nikishin A.M., Malyshev N.A., Petrov E.I. 2014. Geological Structure and History of the Arctic Ocean // EAGE Publications bv, PO Box 59, 3990, DB HOUTEN, the Netherlands, 88 p.

448. Oreshin S., Vinnik L., Peregoudov D. Lithosphere and asthenosphere of the Tien Shan imaged by S receiver functions. // Geophysical research letters, Vol. 29, No 8, 2002.

449. Oreshin S.I., Vinnik L.P., Kiselev S.G., Rai S.S., Prakasam K.S., Treussov A.V. Deep seismic structure of the Indian shield, western Himalaya, Ladakh and Tibet // Earth and Planetary Science Letters 307. 2011. Pp. 415–429.

450. Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves, Geophysics, 64(3), pp. 800-808.

451. Perfettini H., Avouac J.-P. Stress transfer and strain rate variations during the seismic cycle // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. B06402, doi:10.1029/2003JB002917.

452. Peterson J. Observation and modeling of seismic back: ground noise // Open:File Report 93–322. 1993. 95 p

453. Popov, D.V., Danilov, K.B., Zhostkov, R.A., Dudarov, Z.I., Ivanova, E.V, 2014. Processing the digital microseism recordings using the Data Analysis Kit (DAK) software package, Seismic Instruments, 50(1), pp. 75-83. doi.org/10.3103/S074792391401006X.

454. Proulx J., Darbre G.R., Kamileris N. Analytical and experimental investigation of damping in arch dams based on recorded earthquakes // 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No 68.

455. RadExPro, http://radexpro.com/ Accessed August 29, 2017.

456. Ramesh, D.S., Kind, R., Yuan X. Receiver function analysis of the North American crust. Geophysical Journal International. 2002. V. 150. Pp. 91-109.

457. RECONASS http://reconass.eu/ Accessed 20.03.2017

458. Roslov, Yu.V., Sakoulina, T.S. & Pavlenkova, N.I. Deep seismic investigations in the Barents and Kara Seas. Tectonophysics, 472. 2009. Pp. 301–308.

459. Roth E.H., Hildebrand J.A., Wiggins S.M. Underwater ambient noise on the Chukchi Sea continental slope from 2006–2009. J. Acoust. Soc. Am. 131 (1), January 2012. Pp.104-110.

460. Ryberg. T., Fuchs, K., Egorkin, A.V., Solodilov, L. Observation of high-frequency teleseismic Pn on the long-range Quartz profile across northern Eurasia. Journal Geohys. Res., 100. 1995. Pp. 18151-18163.

461. Schlindwein V. Teleseismic earthquake swarms at ultraslow spreading ridges: indicator for dyke intrusions? // Geophys. J. Int., 2012. V. 190. P. 442–456.

462. Schlindwein V., Müller C. and Jokat W. Microseismicity of the ultraslowspreading Gakkel ridge, Arctic Ocean: a pilot study. Geophys. J. Int. (2007) 169. Pp.100–112. Doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03308.x

463. Schulte-Pelkum V., Earle P.S., Vernon F.L. (2003). Strong directivity of oceangenerated seismic noise. Geochem. Geophys. Geosyst., 5, Q03004, doi: 10.1029/2003GC000520.

464. Schuster GT, Yu J, Rickett J (2004) Interferometric/daylight seismic imaging. Geophys J Int 157:838–852

465. Schweitzer J., Fyen J., Mykkeltveit S., Gibbons S.J., Pirli M., Kühn D., Kværna T. Seismic arrays // Version December 2011; DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch9. 80 p.

466. Shimamura M., Yamamura K. A study on the performance of Seismic Early warning system // Proceedings of Railway Mechanics. 2008; 12: 131-138.

467. Simson D.W., Leith W.S., Scholz C.H. (1988) Two types of reservoirinduced seismicity. Bull Seismol Soc Am 78(6):2025–2040

468. Singhal AK, Vaidya N & Leonard AD (1997) Multi-dimensional simulation of cavitating flows using a PDF model for phase change ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, ASME. Paper FEDSM97-3272

469. Skordas E.S., Meyer K., Olson R., Kulhanek O. // Tectonophysics. 1991. Vol. 185.P.295-307.

470. Snieder R., Şafak E. Extracting the building response using seismic interferometry: theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California // Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 96, no. 2, pp. 586–598, 2006.

471. Sokolov S.D., Bondarenko G.Ye., Morozov O.L. et al. Souyh Anyui suture, northeast Arctic Russia: Facts and problems / Miller E.L., Grantz A., Klemperer S.L. (eds.). Tectonic evolution of the Bering ShelfChukchi Sea – Arctic Margin and Ajacent Landmasses. GSA Special Paper. 2002. Vol. 360. P. 209–224.

472. Structural Health Monitoring in a Box [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.shoxsolutions.com/ (дата обращения: 28.04.2017).

473. Tatevossian R.E., Mäntyniemi P., Tatevossian T.N. On the earthquakes in the Northern Baltic Shield in the spring of 1626 // Natural Hazards. 2011. Volume 57(2). Pp 133-150.

474. TGV High-Speed Railway, France: <u>https://www.geosig.com/EEW---TGV-High-Speed-Railway--France-pg89.aspx</u>. Accessed 28.01.2018.

475. The Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Commission. Site Provided by the University of North Dakota: http://www.heatflow.und.edu/data.html. Accessed 3.05.2017.

476. Tomlinson, J.P., Denton, P., Maguire, P.K.H.&Evans, J.R., UK crustal structure close to the Iapetus Suture: a receiver function perspective // Geophys. J. Int., 154, 2003. Pp. 659–665.

477. Trnkoczy A. (2009) Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. In New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP), edited by P. Borman. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ pp 1–20. http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:4097 (accessed on 6 June 2016).

478. Trifunac M.D. (1970). Wind and Microtremors Induced Vibrations of a 22-Story Steel Frame Building. Report EERL 70-011, Earthq. Eng. Res. Lab., Calif. Institute of tech., Pasadena, California, U.S.A.

479. Trifunac M.D. (1972). Comparison between Ambient and Forced Vibration Experiments. Earthquake Eng. And Structural Dynamics, Vol. 1, pp. 133-150.

480. Van Wagoner, N.A., Williamson, M.-C., Robinson, P.T., Gibson, I.L., 1986. First samples of acoustic basement recovered from the Alpha Ridge, Arctic Ocean: new constraints for the origin of the ridge. J. Geodyn. 6, 177–196.

481. Vanneste, M., Mienert, J. and Bunz, S. (2006) The Hinlopen Slide: Agiant, submarine slope failure on the northern Svalbardmargin, Arctic Ocean. Reports of Earth and Planetary Science Letters. V. 245, 1-2, 373-388.

482. Vinnik L., Kozlovskaya E., Oreshin S., Kosarev G., Silvennoinen H., Vaganova N., Kiselev S. Complexity of the Fennoscandian lithosphere // Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-9536, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 27 April – 2 May 2014.

483. Vinnik L.P. Detection of waves converted from P to S in the mantle. // Physics of the Earth and Planetary Interiors, 15 (1977) 39–45.

484. Wi-Fi оборудование для организации беспроводных сетей. http://www.shopwifi.ru/ (Дата обращения 18.06.2013).

485. Wi-Fi оборудование. http://www.winsbs.ru (Дата обращения 18.06.2013).

486. Wilde K. Modal diagnostics of civil engineering structures // Gdansk University of Technology Publishers, 2008, 196 p.

487. Wilson E.L. Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures. A Physical Approach With Emphasis on Earthquake Engineering. Third Edition.// Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 2002, 423 p/

488. Winkelmann, D., and Stein, R. (2007) Triggering of the Hinlopen/Yermak Megaslide in relation to paleoceanography and climate history of the continental margin north of Spitsbergen. Reports of Geochem.Geophys. Geosyst. (G3), V. 8, 6, 1-15. (An electronic journal of the earth sciences doi:10.1029/2006GC001485)

489. Xu Zhenyu; Miao Xuhong; Zuo Hai The Research on Pulsation of Pump Pressure in Water Mist System. Energy Procedia 2015, 66. Pp. 73–76. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.038.

490. Yamaguchi N. Automatic monitoring and diagnostic system for large reversible pump-turbine unit. // Труды Симпозиума IAHR (МАГИ) / Белград, Югославия, 1990.

491. Yamamoto S., Tomori M. Earthquake early warning system for railways and its performance // Journal of JSCE, Vol. 1. 2013. Pp. 322-328.

492. Zhenzhong Shen, Lei Gan, Juan Cui and Liqun Xu (2012). Earthquake Response Analysis and Evaluation for Earth-Rock Dams. Advances in Geotechnical Earthquake Engineering - Soil Liquefaction and Seismic Safety of Dams and Monuments, Prof. Abbas Moustafa (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/29084.

493. ZOND software package [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://zond-geo.ru/english/ (Дата обращения 29.08.2017).

<u>№</u> п/п	Наименование воздействия	Расстояние до ближайшей регистрирую щей станции, км	Дли- тель- ность, t _{cp} , c	Спектр мощности воздействия, (м/c ²)/Гц	Спектр ускорения воздействия, см/(с ² · √Гц)	Преобла- дающая частота, Гц
1	2	3	4	5	6	7
1.	Промышленны й карьер «Покровский»	15.14	65	$10^{-11} \int_{0}^{S(f), (M/c)^{2}/\Gamma \mu} - EW - NS - Z$ $10^{-13} \int_{0}^{10^{-13}} \int_{0}^{10^{-15}} \int_{5}^{10^{-15}} \int_{10^{-15}} \int_{10^{$	10^{-2} $a_{a, CM/(c^{2} \cdot \sqrt{\Gamma_{H}})}$ 10^{-3} $b_{a, CM/(c^{2} \cdot \sqrt{\Gamma_{H}})}$ $b_{a, CM/$	0.934 1.25; 16.88
2.	Карьеры в Воркутинском промышленно м узле	273	85	$10^{-15} \begin{pmatrix} S(f), (M/C)^{2/5} \Gamma_{4} & - EW \\ - NS \\ - Z \\ 10^{-16} & - Z \\ 10^{-17} & - 4 & 8 & 12 & 16 f, \Gamma_{4} \end{pmatrix}$	$3 \cdot 10^{-4}$ $3 \cdot 10^{-5}$ $3 \cdot 10^{-5}$ $3 \cdot 10^{-5}$ $3 \cdot 10^{-5}$ $3 \cdot 10^{-5}$ 10 15	4.69 ; 7.81; 15.23
3.	Промышленны й карьер «СОБР»	198	40	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	4 10 ⁻⁵ 4 10 ⁻⁶ 4 10 ⁻⁶ 4 10 ⁻⁶ 0 5 10 15 f, Fu	2.81; 9.06; 12.81

Приложение А Параметры воздействий природной и техногенной сейсмичности на сооружения платформенных территорий

1	2	3	4	5	6	7
4.	Взрыв газа в жилом доме	1	10-21	10 ⁻¹² 10 ⁻¹⁴ 10 ⁻¹⁶ 10 ⁻¹⁶ 2 4 6 8 f. Ги	$10^{-4} \underbrace{10^{-4}}_{0} \underbrace{10^{-4}}_{0} \underbrace{\frac{10^{-4}}{2}}_{2} \underbrace{\frac{10^{-5}}{4}}_{4} \underbrace{\frac{10^{-5}}{6}}_{6} \underbrace{\frac{10^{-5}}{8}}_{8} \underbrace{\frac{10^{-5}}{1}, \frac{10^{-5}}{1}}_{1} \underbrace{\frac{10^{-5}}{2}}_{1} \underbrace{\frac{10^{-5}}{2}}_$	2.5; 7.03
5	Запуск ракеты «Космос-3М»	97	5-7.8	$10^{-16} \begin{pmatrix} S(f), (M/C)^{2}/\Gamma \mu & - EW \\ - NS \\ - Z \\ 10^{-16} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 10^{-16} & - Z \\ - Z \\$	10^{-3} a, cm/(c ² ·√ Γ µ) 10^{-4} EW NS - Z 10^{-5} 10 15 f, Γ Ψ 2	8.59; 14.84; 17.58
6	Запуск ракеты «Рокот»	97	3.8	$10^{-16} \begin{pmatrix} S(f), (M/C)^{2}/\Gamma \mu & -EW \\ -NS \\ -Z \\ 10^{-16} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S(f), (M/C)^{2}/\Gamma \mu & -EW \\ -NS \\ -Z \\ -$	$10^{-3} - \frac{a, cm/(c^2 \cdot \sqrt{\Gamma_{II}})}{10^{-4}} - \frac{c}{5} - \frac{c}{10} - \frac{c}{15} - \frac{c}{10} $	18.75 ; 19.14

1	2	3	4	5	6	7
7	Запуск ракеты «РС-24»	97	9.9	10^{-16} 10^{-17} 10^{-18} 0 5 10 10 10 10 10 10 10 10	$10^{-4} = \begin{bmatrix} a, cM/(c^2 \cdot \sqrt{\Gamma u}) & & \\ 10^{-5} & & EW \\ 10^{-6} & & Z \\ 10^{-6} & & 5 \\ 0 & 5 \\ 10 & 15 \\ f, \Gamma u \\ 20 \end{bmatrix}$	2.73; 8.59; 13.28
8	Запуск ракеты «Союз-2.1б»	97	1.7	$10^{-13} \\ 10^{-14} \\ 10^{-16} \\ 10^{-16} \\ 0 \\ 5 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\$	10 ⁻³ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁵	5.09; 14.84
9	Землетрясение 22.10.2005 t0=17:46:44.8, lat=64.49, lon=40.95, h=0-13 км.	21.89	24.3	10 ⁻¹³ 10 ⁻¹⁴ 10 ⁻¹⁵ 0 2 4 6 8 f, Гц	$10^{-3} = \frac{10^{-3}}{10^{-4}} = \frac{10^{-3}}{2} = \frac{10^{-3}}{2} = \frac{10^{-5}}{2} = \frac{10^{-5}}{2$	2.03; 5.31; 7.34

1	2	3	4	5	6	7
10	Землетрясение 28.03.2013 t0=07:02:16.2, lat=63.95, lon=41.57, h=2-33 км (наиболее вероятная h=19 км)	84	80	S(f), $(M/c)^2/\Gamma u$ 10 ⁻¹³ 10 ⁻¹⁴ 10 ⁻¹⁵ 0 5 10 15 f, Γu	10^{-3}	5.1; 7.81; 13.13