

На правах рукописи



АНТОНОВСКАЯ Галина Николаевна

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

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Архангельск – 2018

Работа выполнена в лаборатории сейсмологии Института геодинамики и геологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Российской академии наук, г. Архангельск

Научный консультант: **Наталья Константиновна Капустян**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории методов прогноза землетрясений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва

Официальные оппоненты: **Лев Николаевич Сенин**, доктор технических наук, заведующий лабораторией сейсмометрии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевца Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Владислав Борисович Заалишвили, доктор физико-математических наук, профессор, директор Геофизического института – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук», г. Владикавказ

Олег Дмитриевич Рубин, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель генерального директора по технической политике Акционерного общества «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений», г. Москва

Ведущая организация: Институт геологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук»

Защита состоится 25 октября 2018 г. в 14 ч. на заседании диссертационного совета Д 002.001.01, созданного при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН) по адресу: 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 (сейсмологического, сейсмометрического и вибрационного мониторинга) 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 идеи (*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; Верба, 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 междисциплинарная, 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 междисциплинарный 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.

2. 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 недопустимых вибраций 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 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 сеймотектоническое структурирование территории, весьма актуальное для сейсмозонирования 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 поведения 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 работы ориентированы на мониторинг сейсмической обстановки Европейского сектора Арктики, защиту национальных интересов при освоении Арктики, оценка возможности возникновения катастрофических, в первую очередь сейсмических и инициируемых ими природных явлений (просадки, обвалы и пр.).

Разработанные системы сейсмического мониторинга успешно функционируют на ряде высотных зданий г. Москвы (ул. Давыдовская, 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, объединяющая наблюдения за состоянием антропогенных объектов, опасными процессами на территориях их размещения, а также позволяющая дополнительно вести вибромониторинг работающего промышленного оборудования, основанная на использовании сейсмической аппаратуры, унифицированной для комплекса методик, применяемых на объекте, современных способов 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 исследований, выполнены основные экспериментальные 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 личном участии автора в течение 2010-2016 гг. 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), газокompрессорных 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 EGU (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) и многие др.

Основные результаты исследований изложены в 18 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), 3 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 СТ»). 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 «АНИИ», сотрудников ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева и каскада Сулакских ГЭС, сотрудников и брата Ю. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Проблемы сейсмического мониторинга при обеспечении сейсмобезопасности объектов

В настоящее время системы мониторинга предназначены для решения достаточно узконаправленных задач, например: непрерывный контроль шахтного поля или сооружения (плотины, высотного здания) при сейсмических воздействиях, оценка сейсмической балльности территории размещения ответственного объекта и т.д. При этом, если на территории надо выполнить несколько видов работ, то устанавливают несколько принципиально различных систем сейсмического мониторинга, как правило, с конкретным типом датчиков (механические широкополосные или короткопериодные сейсмометры, пьезодатчики), системы оперируют разными схемами сбора и хранения данных. Основная проблема –

отсутствие совместной интерпретации получаемых результатов. Подтверждением этому является анализ аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, где сыграла роль сочетание изменений в геологической среде, в состоянии плотины и возникновении кавитационного жгута в системе плотина-водовод-агрегат (Лобановский, 2009; Тетельмин, 2011; Причины техногенной катастрофы..., 2017). Кроме того, есть процессы и явления, которые остаются вне рассмотрения как используемых нормативов, так научных представлений о происходящей ситуации.

Сейсмические сигналы, используемые для каждой отдельной системы сейсмического мониторинга, искусственно разделяются по времени и по частотному диапазону, но, по сути, они являются частью единого волнового поля (рис. 1.1).

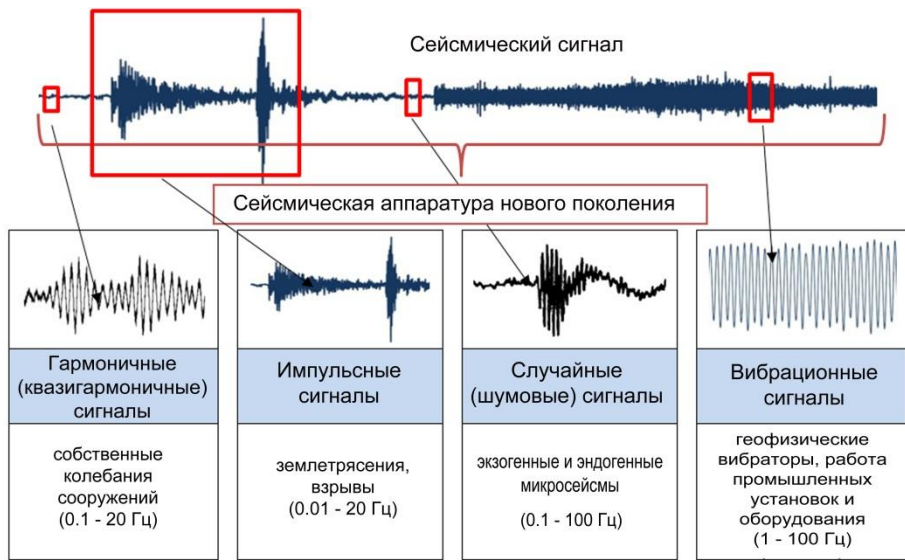


Рис. 1.1. Блок схема разделения волнового поля по типам сигналов с указанием характерного частотного диапазона

Если регистрировать сигналы одним, но «хорошим» инструментом и применять цифровую обработку волновой формы, то можно выделить интересующий сигнал в каждой используемой методике, как показано на рисунке 1.1. Для этого важно проанализировать применяемые методики мониторинга и выявить информативные параметры волнового поля. С другой стороны, важно обобщить сведения об опасных природных и техногенных явлениях и понять, какие параметры, их характеризующие, можно наблюдать сейсмическими методами (таблица 1.1).

Анализ таблицы 1.1 показывает, что на состояние конструкций сооружений и территорий их размещения оказывают влияние разнородные процессы, выявление которых возможно с привлечением сейсмологических знаний, но, как правило, требуется дополнительная разработка методов. Все это составляет основу для требований к аппаратно-методическому комплексу.

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

№ 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 «насыпный грунт основания» (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
Антропогенные 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 гидротрагатов (биения, кавитация)	-//- -//- -//-	+	Наблюдение динамических параметров (частоты турбин, вынужденных воздействий, амплитуда, длительность воздействия)

Ключевым моментом является использование одного типа сейсмического оборудования. При мониторинге важно отличить признаки опасных изменений в состоянии объекта от свойственных ему характерных вариаций во времени (например, ветровые и гидростатические нагрузки, температурные изменения и пр.). Существенно рассмотрение взаимодействия объекта с окружающей средой (например, наведенная сейсмичность водохранилищ ГЭС), влияние работы оборудования на изменения состояния конструкций и основания. При этом при объединении сетей мониторинга разного уровня существует ряд нерешенных вопросов – например, синхронизация всего измерительного оборудования; способы разделения сейсмических сигналов различной природы, в том числе выделение «полезного» сигнала при высоком уровне промышленных помех и пр. Типы объектов и территории их размещения характеризуются яркой спецификой. При этом, особенно актуальна задача развития системы стационарного сейсмического мониторинга в Арктике, где уже сейчас размещены разнообразными ответственными объектами (рис. 1.2). 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 остается открытым. Основной проблемой является близость расположения могильников к углеводородным районам, перспективных к дальнейшим разработкам, а также выявляемая сейчас сейсмичность арктических территорий.

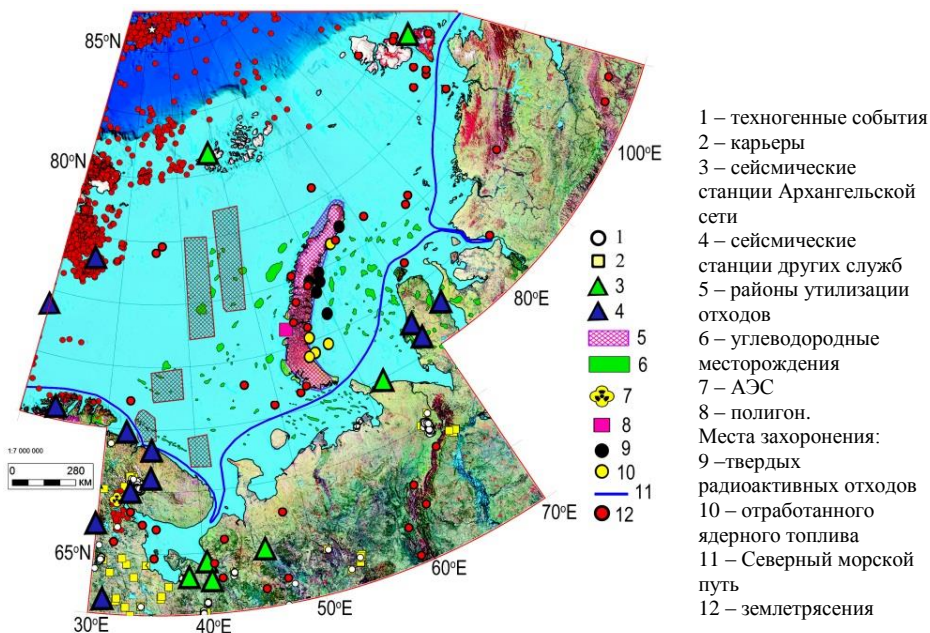


Рис. 1.2. Карта сейсмичности Западного арктического сектора РФ и расположение ответственных объектов (по данным ИБРАЭ РАН и (Атлас МЧС России, 2011))

С учетом недостаточного финансирования, наличия криолитозоны, труднодоступных регионов 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 принять, что подобная сложная по технологии выполнения система должна быть многофункциональной, т.е. решать различные сейсмические задачи, помимо регионального и локального сейсмологического мониторинга.

На основании полученного опыта и с учетом существующей классификации систем сейсмического мониторинга (сейсмологические наблюдения, инженерно-сейсмометрический мониторинг и вибрационная диагностика), в работе формулируются общие требования к современной комплексной системе сейсмического мониторинга.

Назначение современной системы комплексного сейсмического мониторинга:

1. Обеспечение сейсдобезопасности строящихся и реконструируемых объектов.
2. Выявление аномальных участков в теле ответственного сооружения.

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.

3. Оценка возможности чрезвычайных ситуаций природного и природно-техногенного характера на ранней стадии их возникновения.

Система сейсмического мониторинга должна соответствовать требованиям:

1. Надежность, достигаемая по результатам совместного анализа данных различных измерений (сейсмологических, инженерно-сейсмических, вибрационных).

2. Адекватность (способность отображать задаваемые и/или наиболее значимые для безопасного функционирования объекта параметры с заданной погрешностью).

3. Точность (для разрешающей способности разных систем мониторинга соответствовать заданным значениям, определяемым в нормативных документах или условиями безопасной работы по результатам испытаний).

4. Универсальность (возможность использовать предложенную схему для широкого класса ответственных объектов с модификацией для конкретного объекта).

5. 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, инженерно-сейсмометрического и частично вибрационного мониторингов для плотин ГЭС реализуется система, в которой единой аппаратурой ведутся одновременно все виды наблюдений, что сокращает расходы на организацию системы мониторинга не менее, чем на 30%.

6. 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:

1. Соответствия наблюдаемых параметров тем величинам, изменения которых свидетельствуют о состоянии основных несущих конструкций и о процессах в грунтах основания объекта.

2. Соответствия циклов измерений и характерных времен изменений во времени параметров объекта, например, ритма натуральных наблюдений режиму инженерно-геологических и техногенных процессов;

3. Представительности информации об объекте; например, для выявления опасного явления данные по состоянию тела объекта и по грунтам оснований должны содержать взаимосвязанную информацию (наличие трещин и осадка), что определяется методиками наблюдения и пространственным размещением пунктов. При этом получаемая информация должна использоваться для создания/обновления математических моделей.

Выводы. В настоящее время в проблеме мониторинга ответственных объектов наблюдается ряд проблем: 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.

Глава 2. Аппаратурно-методическое оснащение системы сейсмического мониторинга

На основании обобщения сведений об объектах мониторинга, информативных параметрах сейсмических сигналов, методиках, классификации типов мониторинга и регистрирующей аппаратуры составлены таблицы 2.1 и 2.2, анализ которых показывает, что главным является следующее положение. 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. По нашему опыту выбор типов датчиков и регистраторов для системы мониторинга сооружений в принципе можно сделать *a priori*, но желательно опробовать при рекогносцировочных наблюдениях на объекте.

В гл. 2 приведен обзор основных технических характеристик для некоторых сейсмических датчиков и регистраторов, наиболее распространенных на территории РФ, показывающий, что ряд типов современной сейсмологической аппаратуры позволяет регистрировать практически любой из сейсмических сигналов таблицы 2.1. Это обосновывает возможность объединения несколько типов мониторинга: сейсмологического, инженерно-сейсмометрического и вибрационного.

Для комплексирования разных типов систем мониторинга и для создания единой структуры на Крайнем Севере, промышленное освоение которого является одной из задач Стратегии развития Арктической зоны РФ, на первом этапе необходим анализ организации сети сейсмологических станций. При развертывании систем стационарных сейсмических наблюдений необходим учет специфических требований по размещению станций и их аппаратурному оснащению.

Таблица 2.1. Параметры сигналов сейсмического мониторинга

№	Сейсмический сигнал	Частота, Гц	Уровень сигнала	Объект мониторинга	Вид мониторинга	Аппаратура (см. табл. 2.2)	Методика
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Природные и техногенные сейсмические импульсные события	0.01-20	до единиц м/с 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, устройстве 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 остановах мощных электрических машин, в том числе агрегатов ГЭС	N оборотов в секунду)	до 0,5 м/с ²	Плотины, здания ГЭС, оборудование, горные породы бортов водохранилища	ИС, В	А	(Савич и др., 1990; Капустян, Юдахин, 2007)
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)

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
7	Собственные колебания зданий и сооружений	0,1-20	10 мкм/с ² и более	Знание или сооружение, геологическая среда	ИС	А	(Селезнев и др., 1998; Патент 2140625; Патент 2242033; Патент 2242026; Патент 2363896; Юдахин и др., 2007; Антоновская и др., 2010)
8	Микросейсм, 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 500	единицы мм/с ²	Грунты основания здания или сооружения	ИС	Б	(Гурвич, Богачик, 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	-	Знание или сооружение, геологическая среда	Дефектоскопия	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 – вибродиагностический

Таблица 2.2. Классификация сейсмометров, используемых для мониторинга антропогенных объектов

Тип	Полоса частот* Гц	Уровни сигналов min-max, приведенные 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	мм/с ²	скорости	Инженерная сейсморазведка
В	тысячи			Акустический мониторинг, дефектоскопия, ультразвуковые исследования

* Не обязательно в линейной части амплитудно-частотной характеристики

Современное аппаратное оснащение сетей сейсмических наблюдений на Крайнем Севере. На основе анализа сложившихся подходов в этой области, представлена сводная таблица сейсмических сетей Европейской части Арктики с кратким описанием, указанием количества пунктов наблюдений и типом используемой аппаратуры (см. табл. 2.5 в диссертационной работе). Это база для развития сейсмического мониторинга Западного арктического сектора РФ. Специфическим требованием наблюдений и существенным элементом являются организация сейсмических пунктов на арктических территориях.

Нами были разработаны рекомендации по созданию сейсмических павильонов, организации электроснабжения, способам сбора, передачи и хранения данных (Данилов и др., 2013). Результатом является установка четырех сейсмических пунктов 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 Архангельской сейсмической сети. Данные со всех пунктов поступают на сервер лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН.

Технико-методические приемы по построению комплексной системы сейсмического мониторинга рассматриваются на примере мониторинга гидротехнических сооружений (ГТС) и районов их размещения. В настоящее время систему безопасности ГЭС обслуживают три вида сетей мониторинга, основанных на регистрации механических колебаний: сейсмологические наблюдения в верхнем и нижнем бьефе ГЭС; сейсмометрические наблюдения на плотине; система виброконтроля работы агрегатов. Этот принцип закреплён в российских нормах (РД 34.20.501-95) и за рубежом, например в (ANSI S2.47-1990). Причиной такого разделения является наследие эпохи аналогового или аналого-цифрового сбора данных. Анализ основных требований к аппаратуре и способам сбора данных для сейсмических сетей при мониторинге ГЭС (таблица 2.3) показывает, что первые два типа мониторинга могут быть объединены в единую наблюдательную сеть, которая даёт возможность решать часть задач третьего типа – виброконтроль работы агрегатов. В этом состоит специфика создаваемой комплексной системы сейсмического мониторинга.

Таблица 2.3. Основные требования к схемам сейсмического мониторинга

Тип мониторинга	Изучаемый объект	Динамический диапазон датчика, дБ	Динамический диапазон регистратора, дБ	Полоса частот регистр. сигнала, Гц	Точность UTC, мкс
Сейсмологический	Землетрясения	>130	>130 при 50 отсчет/с	0.2-25	1-20
Сейсмометрический мониторинг	Сильные движения	>124	>124 при 50 отсчет/с	0.5-25	1-20
	Микросейсмический шум	>130	>130 при 100 отсчет/с	0.5-50	1-20
Виброконтроль гидроагрегата	Пульсации давления	>130	>100 при 200 отсчет/с	1-100	20
	Вибрация агрегата	>130	>130 при 200 отсчет/с	1-100	1

Таким образом, современная система сейсмического мониторинга ГТС может отвечать следующим требованиям:

1. Осуществлять контроль состояния плотины и грунтов основания.
2. Обнаруживать на ранней стадии опасные гидродинамические явления.
3. Регистрировать и разделять события разной силы и природы (землетрясения, пуски гидроагрегатов и пр.).
4. 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), содержать встроенные программы обработки в реальном времени, включать функции контроля работы системы и калибровки датчиков из центрального пункта.
5. Реализовывать привязку всех каналов к единому времени (UTC) с точностью 1-20 мкс для применения корреляционных методов обработки.

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

При наблюдениях собственных колебаний плотины важен контроль сдвига фаз записей в разных точках. Для этого необходима жесткая привязка к единому приемнику точного времени всех пунктов мониторинга. Подобное требование существует также при создании сейсмических групп (seismic array) (Havskov, Alguacil, 2004). Отметим, что использование современных микропроцессоров, в которых уже заложен стандарт IEEE 1588 v.1, позволяет осуществлять привязку точного времени через Ethernet с микросекундной точностью. К тому же отпадает вопрос о прокладке набора кабелей для передачи цифровых данных и данных времени, с развитием оптоволоконной индустрии – используется один кабель.

Реализацией отмеченных выше требований является создание по нашему техзаданию трехканального отечественного регистратора сейсмических сигналов ADAS3 (Удаленный регистратор..., 2013) (рис. 2.1). Основные параметры: 32-битное АЦП, динамический диапазон 130 дБ при 250 отс/с, мастер времени - GPS модуль с высокостабильным VCXO генератором с частотой 10 МГц и выходом секундных импульсов, привязка времени через Ethernet по стандарту IEEE 1588 с микросекундной точностью, рабочий диапазон температур -20...+ 60°C.

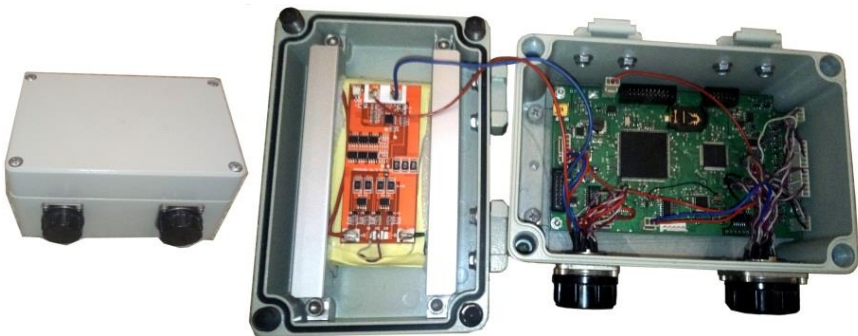


Рис. 2.1. Регистратор сейсмических сигналов ADAS3 внешний вид (слева) и размещение внутри корпуса (справа)

Реализованные параметры, в первую динамический диапазон, позволяет выделять на сейсмограммах, как местное землетрясение, так и пуски гидроагрегата, причем в различных пунктах регистрации: на плотине, береговых примыканиях и в машзале (рис. 2.2). В дополнении к регистратору ADAS3 было разработано программное обеспечение, с помощью которого можно выполнять следующие задачи:

1. Проводить мониторинг вибраций гидроагрегатов (ГА), осуществлять дополнительный контроль их работы и выявлять потенциально опасные ситуации;
2. Просвечивать тело плотины и прибортовых частей с использованием механических вибраций при работе ГА (оборотная и двойная оборотная частоты);
3. Наблюдать собственные колебания плотины, следить за изменением собственных частот и амплитуд, сравнивать с расчетной моделью, выявлять зоны изменения свойств;
4. Регистрировать сейсмические события и оценивать реакцию на них плотины;
5. Регистрировать потоки микротресков, свидетельствующие об изменении напряженно-деформированного состояния швов плотины, массивов бортов или зон бортовых примыканий.

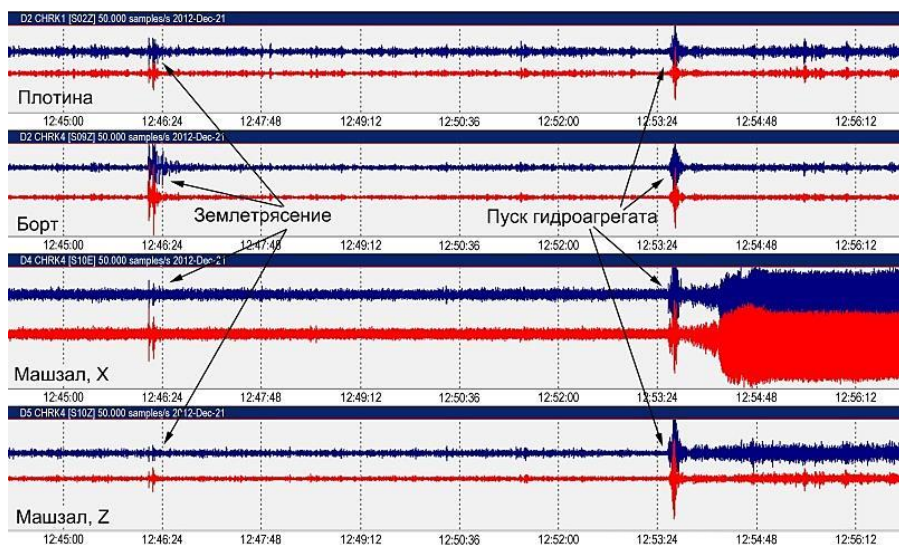


Рис. 2.2. *Возможности выделения сигналов разной природы, Чиркейская ГЭС: синий цвет – естественный сигнал, красный цвет – фильтрованный*

Выводы. 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.

Данный факт позволяет расширить сферу задач, решаемых 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). Другая, не менее важная перспектива открывается для мониторинга ответственных сооружений и районов их размещения. К примеру, для ГТС, использование единой сейсмической аппаратуры позволяет соединить в едином комплексе 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.

Глава 3. Сейсмический мониторинг Западного арктического сектора РФ

Построение систем наблюдения зависит от предыстории и от решаемых задач. Представлены этапы развития сейсмологии в Баренцевоморском регионе, в том числе Архангельской сейсмической сети (АСС). Присвоение в 2014 г. АСС статуса уникальной научной установки (УНУ) определено кругом решаемых задач:

1. Телесейсмический мониторинг в структуре ФИЦ ЕГС РАН.
2. Региональный сейсмический мониторинг Европейского сектора Арктики с выделением сейсмогенерирующих структур и увязкой их с геодинамикой.
3. Уточнение строения земной коры и верхней мантии.
4. Проработка методических вопросов выделения на записях и локации сейсмических событий природного и техногенного характера.

Телесейсмический мониторинг в структуре ФИЦ ЕГС РАН. В результате регистрации и обработки землетрясений формируется ежедекадный станционный бюллетень телесейсмических событий. Ежегодно станциями АСС регистрируется более 2000 мировых землетрясений (*Сейсмологические исследования...*, 2011). Согласно (Французова и др., 2009; Конечная, 2015 и др.), представительный уровень магнитуды АСС для телесейсмических событий $m_b = 5.3-5.5$.

Региональный мониторинг. В настоящее время сейсмический мониторинг Европейского сектора Арктики осуществляются рядом отечественных и зарубежных сейсмических служб и сетей, среди которых: норвежский сейсмологический центр NORSAR, Кольский филиал Единой Геофизической Службы РАН (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) и АСС ФГБУН ФИЦКИА РАН.

Каждая служба имеет свои приоритетные зоны регистрации землетрясений, объединение усилий позволяет повысить точность локации эпицентров землетрясений и оценки энергетического уровня. По базам данных NORSAR, АСС и КоФ ФИЦ ЕГС РАН 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 это районы хребтов Мона и Книповича, арх. Шпицберген; для Архангельской сети – это район хр. Гаккеля и арх. Земля Франца-Иосифа и арх. Новая Земля, шельф Европейского сектора Арктики (рис. 3.1) (Хуторской и др., 2015; Антоновская и др., 2018).

Обобщенный каталог содержит информацию о землетрясениях Европейского сектора Арктики, произошедших выше 70° с.ш. и 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 ряде случаев параметры землетрясений рассчитаны только одной сетью. Такой подход дает основу для поиска события в волновых формах других сетей, что эффективно, т.к. часто слабые события пропускаются. Магнитудный диапазон – от 0.9 до 6.2, представительная магнитуда 2.9.

По данным АСС ежемесячно составляются каталоги и карты сейсмичности Европейского сектора Арктики (<http://fciarctic.ru/index.php?page=geoss>), которые отражают природную и техногенную сейсмичность изучаемого региона, построены региональный и локальный годографы, обработка проводится по разработанной методике (Конечная, 2015).

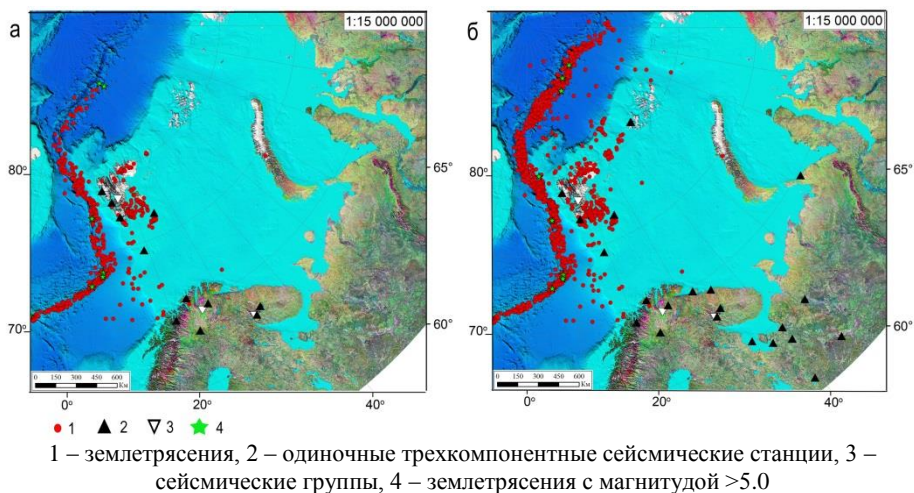


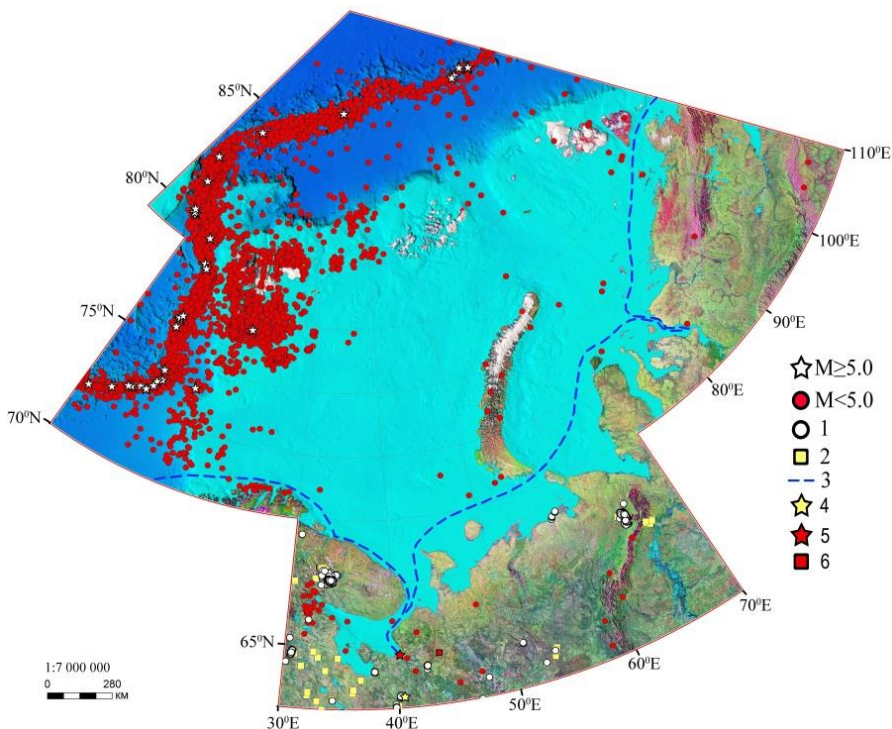
Рис. 3.1. Сейсмические события 2012-15 гг. по данным NORSTAR (а) и как результат кооперации NORSTAR, КоФ ФИЦ ЕГС РАН и ФГБУН ФИЦКНА РАН (б)

За 2011-2017 гг. по данным АСС магнитудный диапазон региональных событий от 0.6 да 6.0 для Западного арктического сектора РФ, представительный уровень магнитуды ($M_{L_{пред}}$) от 2.7 до 3.5. Разброс в значениях $M_{L_{пред}}$ в основном связан с повышением уровня микросейсмического фона пункта «Земля Франца-Иосифа» из-за строительных работ, осуществляемых на острове.

Для исследуемого нами района составлена сводная карта сейсмичности (рис. 3.2) по данным: Обобщенного сейсмического каталога с дополнением данных АСС за 2005-2017 гг., сведения о землетрясениях с 1974 г. по 2017 гг. для района арх. Новая Земля, для севера ВЕП – с 1991 г., которые подразделяются на: землетрясения и техногенные события (взрывы; запуски и падения ступеней ракет). На континентальной части сейсмические события – преимущественно техногенные, исключением является Кандалакшский грабен, где отмечается природная сейсмичность. Зафиксированы землетрясения в районе прохождения Северного морского пути, что наглядно доказывает актуальность для его безопасности проводимых исследований и развития сейсмических сетей в Арктике.

Совершенствуется локация событий. На основе данных сейсмического пункта «Земля Франца-Иосифа» АСС в лаборатории сейсмологии построена скоростная

модель с применением методологии функции приемника (Vinnik, 1977; Vinnik et al., 2014), которая легла в основу регионального годографа NOES (Morozov et al., 2015). Согласно сравнению использования набора годографов: Sval, BARENTS, BARENTS3D и IASPEI91 показано, что при обработке землетрясений западной и центральной частей хребта Гаккеля, а также района арх. Земля Франца-Иосифа наиболее эффективным является годограф NOES (Morozov, Ваганова, 2017).



1 – карьерные взрывы; 2 – карьеры; 3 – линия Северного морского пути; пункты: 4 – запуск ракет; 5 – взрывов газа; 6 – падения ступени ракеты

Рис. 3.2. Сводная карта эпицентров сейсмических событий, по данным: Обобщенного сейсмического каталога с дополнением данными Архангельской 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 3.1) за 2000-2015 гг. показывает, что количество сильных событий ($M \geq 5.0$) 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. Все это демонстрирует недостаточность информации о сейсмической активности арктических территорий и эффективность подхода подключения к обработке волновых форм всех доступных сетей (Конечная, 2015). Кроме того, полученная новая карта сейсмичности является

основой для сеймотектонического структурирования территории и уточнения геодинамических представлений.

Таблица 3.1. Параметры сейсмичности арктического региона за 2000-15 гг.

Период, гг.	Количество землетрясений			Всего
	$M < 3.5$	$3.5 \leq M < 5$	$M \geq 5$	
2000-05	778	125	24	927
2005-10	1274	129	36	1439
2010-15	2818	237	28	3083
Всего	4870	491	88	5449

Связь сейсмичности, аномалий теплового потока с геотектоникой Баренцевоморского региона. Сеймотектоническое структурирование. Новые возможности, создаваемые принятой стратегией развития сейсмических наблюдений, покажем на примере уточнения представлений о геодинамике региона. За основу была взята схема тектонического районирования Баренцево-Карского шельфа, составленная (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 пространственным распределением землетрясений за 2000-2015 гг. и имеющимися представлениями о физике процессов в отдельных районах, которое позволило выделить следующие особенности (рис. 3.3) (Антоновская и др., 2018):

1. Активизация сейсмичности сводово-блокового поднятия Свальбардского архипелага (Шпицберген), арх. 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.

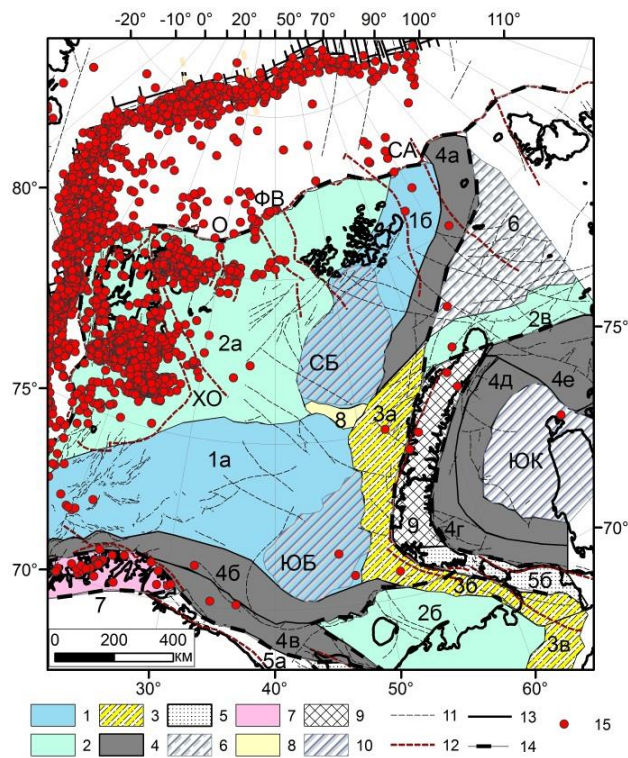
2. Растяжение окраины континентального шельфа и его удлинение в желобах Франц-Виктория, Святой Анны и Орли (Верба, 2007; Сорохтин и др., 2016) отражается в виде слабой сейсмичности с диапазоном значений магнитуд землетрясений M_L от 0.6 до 4.9. Прослеживается четкая приуроченность эпицентров землетрясений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

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 ($t_0=09:52:55.0$, lat 80.11, lon 72.71, $M_L=2.7$) и 20.11.2015 ($t_0=15:43:17.49$, lat 71.18, lon 32.48, $M_L=2.4$) соответственно, и два события в Кольской моноклинали 05.11.2002 ($t_0=07:31:16.22$, lat 70.17, lon 34.25, $M_L=1.6$) и 02.11.2000 ($t_0=08:14:24.61$, lat 70.12, lon 36.56, $M_L=1.1$).

5. Сейсмические события зафиксированы в краевой восточной части Баренцевоморской плиты в Новоземельской складчатости и прогибе Седова. Например, сейсмические события на Новой Земле: 11.10.2010 ($t_0=22:48:29$, 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).



I – депрессии: *а* – Центрально-Баренцевская; *б* – Северо-Баренцевская; 2 – платформенные массивы: *а* – Свальбардская антеклизы, *б* – Печорская плита, *в* – Северо-Сибирский порог; 3 – краевые прогибы: *а* – прогиб Седова; *б* – Коротайхинская впадина; *в* – Косью-Роговская впадина; 4 – склоны сверхглубоких депрессий: *а* – Восточно-Баренцевская зона ступеней; *б* – Южно-Баренцевская зона ступеней; *в* – Кольская моноклираль; *г* – Восточно-Новоземельская моноклираль; *д* – Восточно-Новоземельская зона ступеней; *е* – Северо-Сибирская зона ступеней; 5 – Байкальская складчатость: *а* – Тиманский кряж; *б* – Пайхойский кряж; 6 – Северо-Карская синеклиза; 7 – Скандинавская складчатость каледонского возраста;

8 – Лунинская седловина; 9 – Новоземельская складчатость раннекембрийского возраста; 10 – сверхглубокие впадины: ЮБ – Южно-Баренцевская; 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

Рис. 3.3. Пространственное распределение современной сейсмичности на карте основных структурно-тектонических элементов Баренцевоморского региона, составленной по данным (Ступакова, 2011; Arctic Petroleum Geology, 2011)

В таблице 3.2 представлена сводная информация о сейсмичности и тепловом потоке согласно обобщению баз данных по (Davies, Davies, 2010; Хуторской и др., 2013; The Global Heat Flow Database) для отмеченных платформенных и океанических тектонических структур. Корреляция сейсмичности со значениями теплового потока прослеживается в районах СОХ, максимальная концентрация событий приурочена к центральной оси. Для северной части ВЕП явной зависимости не наблюдается, за исключением Северо-Баренцевской зоны поднятий.

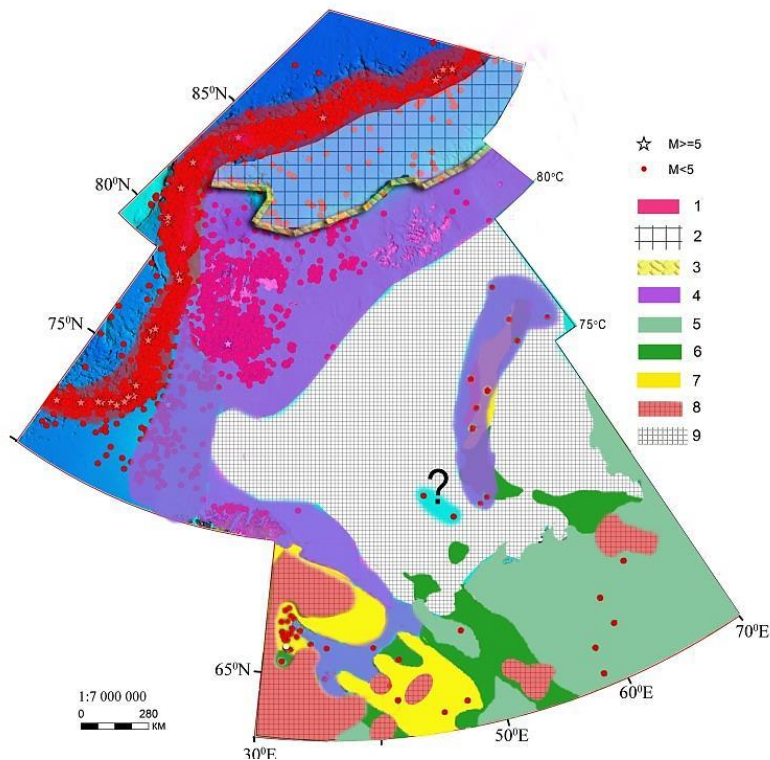
Таблица 3.2. Параметры сейсмичности и теплового потока для тектонических структур Европейского сектора Арктики

Структуры		Землетрясения			Средние значения теплового потока, мВт/м ²
Надпорядковые структуры	Структуры I и II порядка	Кол-во	M _L max	M _L ср	
Баренцевская плита	Центрально–Баренцевская депрессия (1а)	23	3.6	2.5	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, 100-300
	трог Орли (исключение)				
	прогиб Седова (3а)	2	2.3	2.3	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	2.4	60-70
Тимано-Печорская плита	Кольская моноклираль (4в)	2	1.6	1.4	50-60
	Печорская плита (2б)	-	-	-	40-50
	Кортаихинская впадина (3б)	-	-	-	40
	Косью–Роговская впадина (3в)	-	-	-	30-40
Западно-Сибирская плита	Тиманский кряж (5а)	-	-	-	50
	Южно–Карская синеклиза (6а)	1	4.1	4.1	70
	Восточно–Новоземельская моноклираль (4г)	-	-	-	60
	Восточно–Новоземельская зона ступеней (4д)	-	-	-	60
Новоземельская микроплита	Северо–Сибирская зона ступеней (4е)	-	-	-	60
	Новоземельская складчатость раннеиммерийского возраста (9)	5	4.5	3.2	60
Северо-Карская плита	Пайхойский кряж (5б)	-	-	-	60
	Северо–Сибирский порог (2в)	1	2.7	2.7	60-70
Балтийский щит	Северо–Карская синеклиза (6б)	-	-	-	70
	Скандинавская складчатость каледонского возраста (7)	33	2.8	1.9	40-50
Евразийский и Северо-Атлантический бассейны	Котловина Нансена	135	4.3	2.5	60-80
	СОХ	3224	6.6	2.8	>100

Таким образом, пространственное распределение землетрясений отражает действие спрединговых процессов, в том числе трансформных перемещений, а также является результатом тектонических напряжений, генерируемых непосредственно в краевых частях Баренцевоморской плиты, а в центральной её части зафиксированы единичные события. Следует отметить, что в местах

расположения/захоронения особо ответственных объектов и в районах углеводородных месторождений в Баренцевом и Карском морях также отмечается сейсмическая активность (рис. 1.2).

Для разных типов событий (землетрясение, взрыв) проведено сопоставление их расположения с характерными геодинамическими процессами, присущими для территорий. В результате, нами составлена схема сейсмотектонического структурирования Баренцевоморского региона и прилегающих областей (рис. 3.4).



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

Рис. 3.4. Сейсмотектоническое структурирование Баренцевоморского региона и прилегающих областей

Учитывая, что такая схема востребована для освоения Арктики, в дополнение к ней в работе приведены характерные спектры ускорений сейсмических воздействий (приложение А). При составлении схемы для землетрясений севера ВЕП и Белого моря выполнен теоретический расчет возможной максимальной интенсивности (таблица 3.3) с использованием уравнения макросейсмического поля (по Н.В.

Шебалину), применяемого для платформенных территорий (*Сейсмическая сотрясаемость...*, 1979) в виде $I = 1.5MS - 3.5 \log R + 3.0$, где R – расстояние от гипоцентра землетрясения до точки наблюдения, глубины событий оценены согласно (*Морозов и др.*, 2018).

Таблица 3.3. Параметры землетрясений

Дата	Время	Широта	Долгота	M	R, км	I _{max}	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

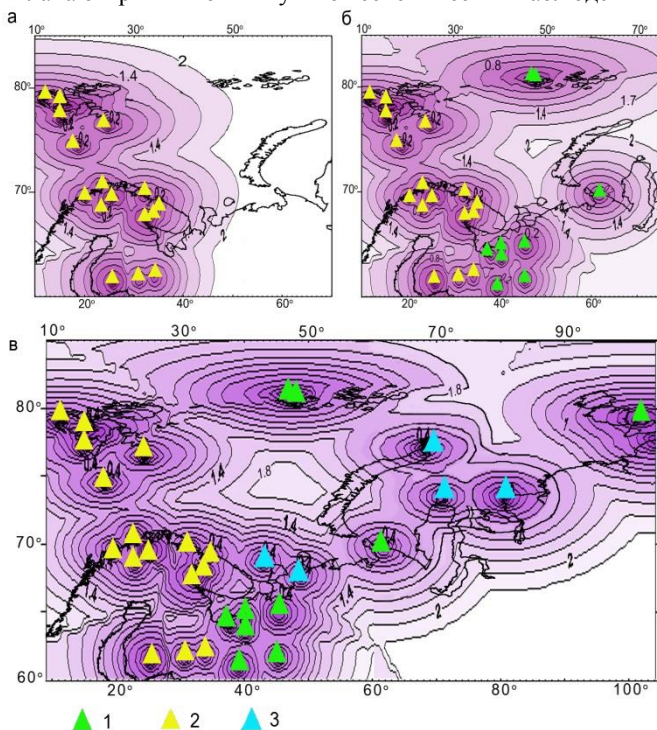
Цвета согласно ОСП-2015-С: *желтый* – 7 баллов, *зеленый* – 6 баллов, *светло-зеленый* – 5 баллов

Сделана попытка оценить интенсивность воздействий на сооружения при производстве взрывных работ для некоторых карьеров Архангельской области (таблица 3.3). В расчетах использовались сильные взрывы, R – расстояние до ближайшего населенного пункта.

В настоящее время в основе проектирования ответственных объектов лежит карта ОСП-2015-С (*СП 14.13330.2014*), существует комплект карт ОСП-2016 (*Уломов, и др.*, 2016). Данные карты ОСП затрагивают только сушу, для морских (в том числе шельфовых) территорий оценке сейсмической опасности уделено недостаточно исследований. Заметим, что районирование морских территорий присутствовало в картах ОСП-97. Существующие нормативы проектирования морских сооружений, например (*ГОСТ Р 57123-2016*), опираются на имеющуюся информацию о сейсмичности региона, которая практически отсутствует для арктических морей, в результате возможны аварии из-за недостаточной проработки этого вопроса. В настоящее время пробел можно восполнить на основе предлагаемой схемы сейсмотектонического структурирования, что подтверждается соответствием рассчитанной нами сейсмической интенсивности (таблица 3.3) значениям по карте ОСП-2015-С (для учтенных в ней территорий).

Таким образом, представленная возможность проведения сейсмотектонического структурирования Баренцевоморского региона и прилегающих областей на основании анализа слабой природной и техногенной сейсмичности, подключение воздействий о геодинамике и нацеленности мониторинга на определение воздействия на сооружения показывает перспективность подхода, практическое применение результатов которого возможно при актуализации карт ОСП.

Учитывая перспективность использования слабой сейсмичности и с целью повышения чувствительности сети, были выполнены в программе MinMag В.Ю. Бурмина (ИФЗ РАН) теоретические расчеты минимально возможных магнитуд землетрясений до функционирования АСС, с учетом ее нынешней конфигурации и с реализацией плана открытия новых пунктов сейсмических наблюдений (рис. 3.5).



1 – станции АСС, 2 – сейсмические станции других сетей, 3 – планируемые места установки сейсмических станций

Рис. 3.5. Карты теоретических оценок минимальных магнитуд землетрясений Европейского сектора Арктики до (а), после (б) создания АСС и с учетом открытия в будущем сейсмических станций в Российской Арктике (в)

Согласно рисунку 3.5а, до организации АСС минимальное значение регистрируемой магнитуды землетрясений Западного арктического региона составляло в среднем $M_{\min}=2.0$, причем это справедливо только для западной части этого региона. Из области мониторинга «выпадают» слабые землетрясения, происходящие в районе арх. Новая Земля, арктических желобов, границы континентального шельфа и пр., что отражает геодинамику шельфовых областей.

Существующая конфигурация АСС (рис. 3.5б) практически полностью «покрывает» восточную часть Западного арктического сектора РФ. Использование в совместной обработке волновых форм других сейсмических служб позволяет охватить практически всю зону Европейского сектора Арктики, при этом $M_{\min}=2.0$ для всего региона. Недостаточно изученными остаются территории восточнее арх.

Новая Земля и Земля Франца-Иосифа, в том числе граница континентального шельфа и зона срединно-океанических хребтов, что можно восполнить установкой дополнительных станций. Для теоретических расчетов (рис. 3.5.в) подбирались районы, в которых существует реальная возможность создания пунктов сейсмических наблюдений, в результате этого для всего региона $M_{\min}=1.8$. Придерживаясь концепции предложенного развития сети, появляется возможность мониторинга центральной Баренцево-морской зоны, которая согласно рисунку 3.4 требует дополнительных исследований.

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 $M_{\text{пред}} 2.7-3.5$.

Следующим этапом является установка необходимого минимального количества сейсмических станций в местах, представленных на рисунке 3.5в, что позволит регистрировать события с $M_{\min}=1.8$. Это, в свою очередь, позволит получить инструмент наблюдения за геодинамическим режимом в районах разведки и добычи энергетических сырьевых ресурсов Западной арктической зоны РФ. Кроме того, это даст сведения для уточнения скоростных сейсмических моделей, создание карты новейшей сейсмической опасности, повышения чувствительности систем мониторинга по выявлению ЧС природного и техногенного характера.

Глава 4. Сейсмический мониторинг состояния плотин ГЭС и гидроагрегатов

Приводится сводка основных опасных природных явлений и техногенных процессов, выполняется анализ действующей нормативной и технической документации, касающейся требований обследования состояния плотин и гидроагрегатов (ГА) (*Капустян, Юдахин, 2007; Марчук, Марчук, 2006; Договор № 1-407-1508/ОГ-175-13-2013; база нормативных документов и публикаций ICOLD; Chanson, 2004; 2009 и др.*). Представлен обзор экспериментальных методов мониторинга плотин и контроля работы ГА с указанием их чувствительности к опасным процессам. Анализ существующей ситуации позволил предложить новые методики и способы сейсмического мониторинга.

Использование слабых землетрясений для оценки состояния плотин. Суть методики: в ключевых точках объекта устанавливаются сейсмодатчики и проводится регистрация тестового воздействия. Затем составляется (или используется имеющаяся) численная модель сооружения, для которой задается наблюдаемое воздействие и рассчитываются параметры, характеризующие реакцию сооружения, которые сопоставляются с наблюдаемыми значениями. При расхождении значений проводится итерационное изменение модели до согласования параметров. Об изменениях в объекте судят по получаемой модели. В отличие от существующих подходов в качестве «входного» сигнала может быть использована запись слабого землетрясения или пусков ГА с датчиков, установленных в бортовых примыканиях плотины. В методике при несовпадении перемещений в i -ом пункте установки датчика 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 ГА

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:

1. Устраняется погрешность из-за несоответствия грунтовых условий более далекой точки, в которой обычно записан «входной» сигнал, за счет того, что сигнал зарегистрирован в аналогичных грунтовых условиях, что и основание плотины.

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

3. Реализуется возможность мониторинга практически в любое время, используя, например, пуски ГА.

При подборе тестирующего сигнала важно: 1) чтобы частотный диапазон «входного» сигнала включал 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.

Пример применения методики показан на системе мониторинга Чиркейской ГЭС, Республика Дагестан. В качестве «входного» сигнала используется запись с бортового примыкания (звездочка на рис. 4.1) землетрясения 31 марта 2013, ощущавшегося на плотине как 2-3 балльное и сравнимое по сейсмической интенсивности с пусками ГА.

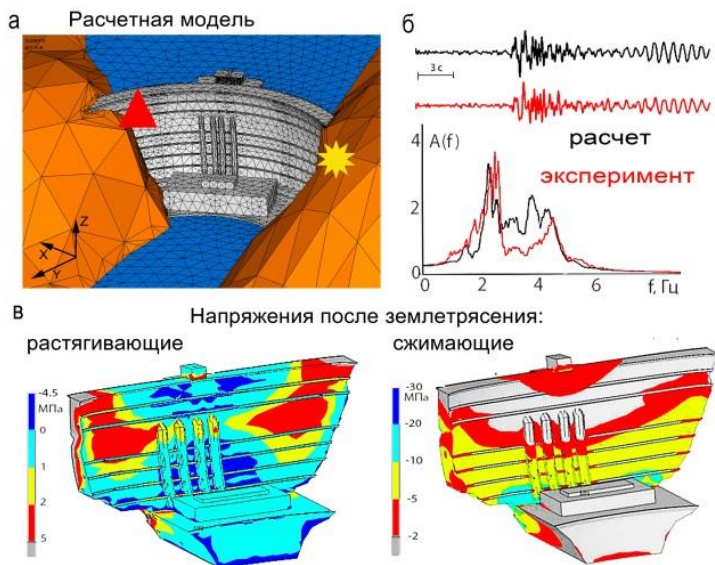


Рис. 4.1. Мониторинг состояния плотины Чиркейской ГЭС с помощью тестовых воздействий: расчетная модель (а) и воздействия: записи и амплитудные спектры расчетных и реальных колебаний на плотине (б), в – расчетные поля напряжений после землетрясения; на модели – звездочка и треугольник – точки приложения воздействия и регистрации отклика

Сравнение расчетных и экспериментальных записей, полученных на плотине, показывает их хорошее согласие, что иллюстрируют волновые формы и амплитудные спектры в одной из точек (треугольник на рис. 4.1). Существенно, что тестовое воздействие позволило получить пространственное распределение напряжений в плотине. Обратим внимание на картину растягивающих напряжений, наиболее «неприятную» для железобетонных конструкций. Выделяется асимметрия в распределении напряжений в области бортовых примыканий, особенно в левой части. 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. Отметим, что слабые землетрясения в сейсмоактивном районе происходят достаточно часто, что позволяет проводить оценку состояния плотины существенно чаще, чем дожидаясь сильных событий.

Натурные наблюдения опасных процессов в ГА. Принципиальные возможности мониторинга работы ГА в удаленной точке приведены в работах (Храпов и др., 2012), а также в материалах обработки данных системы мониторинга Чиркейской ГЭС (ЧГЭС), функционирующей до ее модернизации, любезно предоставленных А.Н. Ивакиным (ИФЗ РАН). На записях им был выделен сигнал, амплитуда которого была в десятки раз интенсивнее обычного пуска. Сигнал возникал спорадически, был отмечен одновременно на всех действующих датчиках ЧГЭС и путем «расследования», предпринятого А.Н. Ивакиным, был связан с работой агрегата № 4. В результате было инициировано обращение от ИФЗ РАН в службу безопасности ГЭС, что послужило дополнительным обоснованием для выбора именно этого агрегата в качестве начального при проведении планового ремонта, в ходе которого были выявлены серьезные дефекты.

Существует большое количество публикаций, посвященных теоретическим расчетам и компьютерному моделированию аномальных пульсаций давления и кавитационных явлений в ГА, но экспериментальные сведения в этой области крайне скудны. Установлено (Абелев, Соловьева, 1983), что кавитация возникает при специфическом соотношении напора воды и мощности ГА. Практическим приложением является разделение совокупности значений напор-мощность на зоны, в которых разрешена или запрещена работа ГА (пример, см. на рис. 4.2). Наиболее близко к решению вопроса о возникновении аномальных пульсаций подошли в работах (Panov et al., 2014; Dekterev et al., 2015), но датчик устанавливался непосредственно на ГА. Изучение возможности наблюдения этого явления в удаленной точке не проводилось, хотя это важно, как показывает опыт аварии на СШГЭС (Селезнев и др., 2015).

Исследования параметров механических вибраций, сопутствующих вращению жгута, в удаленной точке проводилось нами на испытательном стенде ОАО «Силовые машины» (Antonovskaya et al., 2017). Частота вращения F жгута несколько меньше, чем первая оборотная частота вращения ГА f_0 , $F = k * f_0$, $k \sim 0,7$. Полоса частот, в которой проявляется вибрация, создаваемая жгутом, определяется как: $\Delta f = f_k - f_n \sim 1$ Гц, где f_k и f_n – соответственно конечная и начальная частоты полосы. Амплитуда вибраций, создаваемых при вращении жгута, не постоянна, это пульсирующий процесс, но имеющий средний интервал времени постоянства амплитуды t .

В качестве примера рассмотрим анализ записей системы сейсмического мониторинга ЧГЭС, выполненных акселерометром, установленным в машинном

зале (рис. 4.2). Наблюдаются оборотные частоты: основного тона $f_0=3.33$ и обертоны 6.66 и 9.99 Гц. Кружком выделен временной интервал, в котором отмечены повышенные значения мощности колебаний в полосе от 1.7 до 2.8 Гц, т.е. $\Delta f=0,7*f_0\pm 0,5$ Гц. Причиной возникновения опасной вибрации стало изменение параметров работы ГА №1, в том числе выход из области разрешенного режима работы (рис. 4.2б). Ситуация была исправлена при резком изменении мощности, что отразилось на СВАН-диаграмме в исчезновении колебаний на «жгутовой» частоте.

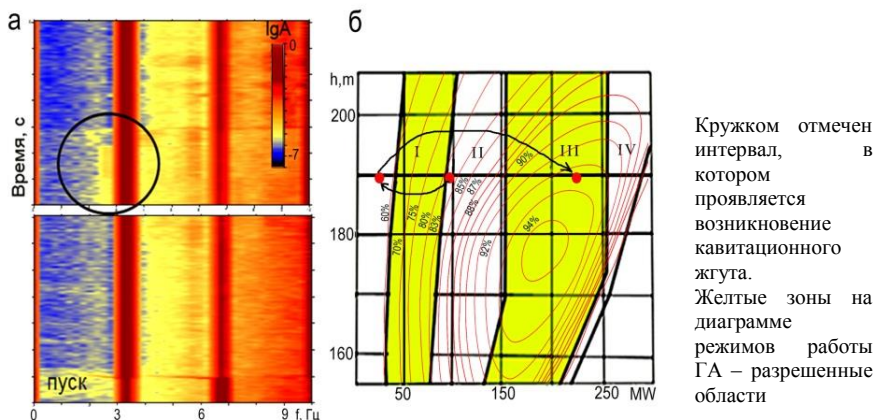


Рис. 4.2. Результаты спектрально-временного анализа (СВАН)- записей акселерометра в машинном зале Чиркейской ГЭС (а) и диаграмма режимов работы гидроагрегата Чиркейской ГЭС, на которой точками и стрелками показана последовательность изменения режимов работы гидроагрегата (б)

Учитывая, что при реализации способа уровни фоновых вибраций могут быть различны, требуется его настройка перед применением, которая иллюстрируется на примере ЧГЭС. По результатам предварительных наблюдений, позволяющих получить достаточно данных для статистической обработки, например, больших 100т, определяется допустимая мощность вибраций $W_0=W_{cp}+3\sigma$, где W_{cp} – среднее значение и σ – стандартное отклонение значений мощности в полосе частот Δf . Обработка записей выполняется путем расчета СВАН в скользящем временном окне с определением мощности $W(t)$ и допустимой мощности вибраций W_0 .

Анализ проявлений отклонений от штатной работы гидроагрегатов. Другие типы отклонения от штатной работы ГА также возможно выявлять в режиме реального времени с использованием системы сейсмического мониторинга, созданной с учетом требований, изложенных в гл. 2. К примеру, совместная работа системы агрегат-водовод ЧГЭС проявляется в возникновении низкочастотных колебаний (рис. 4.3). В диссертации рассмотрен набор записей пусков агрегатов, среди которых отмечены как «нормальные», так и «аномальные» пуски.

Другой пример (рисунок 4.4) относится к нештатной работе ГА, с формированием цугов колебаний на частотах 2 и 4 Гц, т.е. на частотах обертонов собственных колебаний плотины ЧГЭС. Они могут быть продолжительными – до нескольких часов. Подобное явление наблюдалось не только на ЧГЭС, но и на Бурейской ГЭС (Храпков и др., 2007).

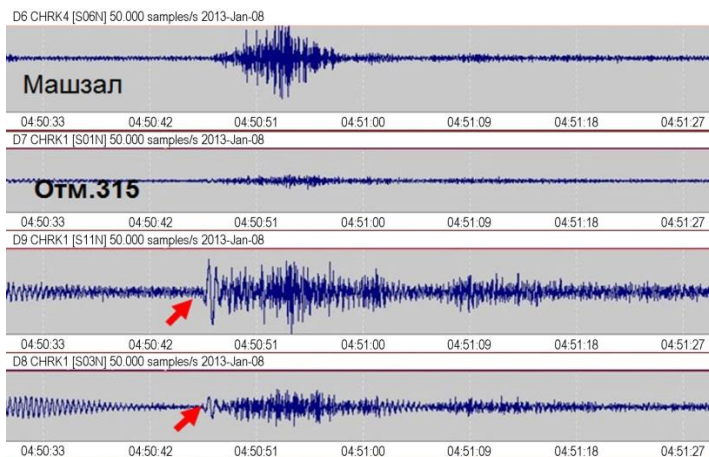


Рис. 4.3. Пример «аномального» пуска агрегата (запись в маизале – сверху и на отм. 315, стрелка – возникновение низкочастотных колебаний)

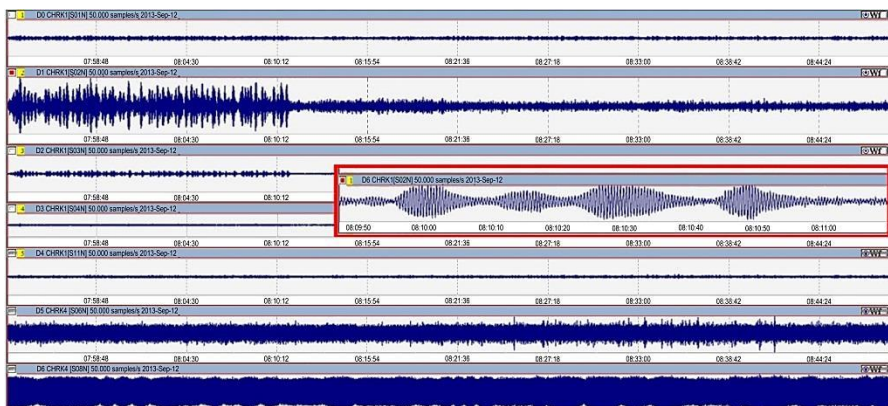


Рис. 4.4. Пример записи нештатной работы агрегата системой мониторинга ЧГЭС, в маизале (нижние 2 трассы) амплитуды уменьшены, наиболее сильная вибрация отмечается на ст. 2, отм. 315 м (вторая трасса сверху). На врезке приведена развертка записи на ст. 2, радиальная компонента колебаний

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 c – скорость звука в воде (1500 м/с), L – высота столба воды. При значении для ЧГЭС $L=170$ м, получаем $f \approx 2,2$ Гц, что совпадает с полученными значениями возбуждаемых частот. Отмечено, что такие автоколебания могут быть опасным явлением для работы ГА. Существенно, что система сейсмомониторинга позволяет заметить эти колебания практически в реальном времени, что способствует оперативному устранению ЧС.

Комплексирование сейсмических методов для обследования плотин и районов их размещения. Идеология сейсмического просвечивания техногенными вибрациями была заложена в 1980-х гг. при выполнении программы «Вибрационное просвечивание Земли», когда была доказана возможность регистрации очень слабых гармонических сигналов на значительных удалениях от источника. Отметим только ряд работ: (Бунгум и др., 1981; Плескач, 1986; Александров, Мирзоев, 1997; Юдахин и др., 2007 и др.). Использование сигналов от мощных уже работающих установок 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.

Рассмотрим эту возможность на примере обследования плотины Song Tranh-2, Центральный Вьетнам. В силу конструктивной особенности и высокого уровня промышленных помех, выделить собственные частоты колебаний плотины было сложно. Промышленные вибрации отчетливо проявляются в спектрах мощности микросейсм в виде соответствующих пиков (рис. 4.5) на частотах 3.125 Гц и примерно 4.6 Гц.

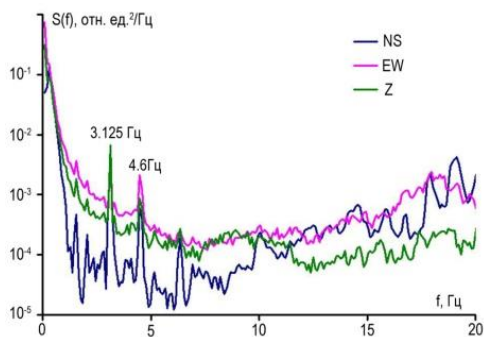
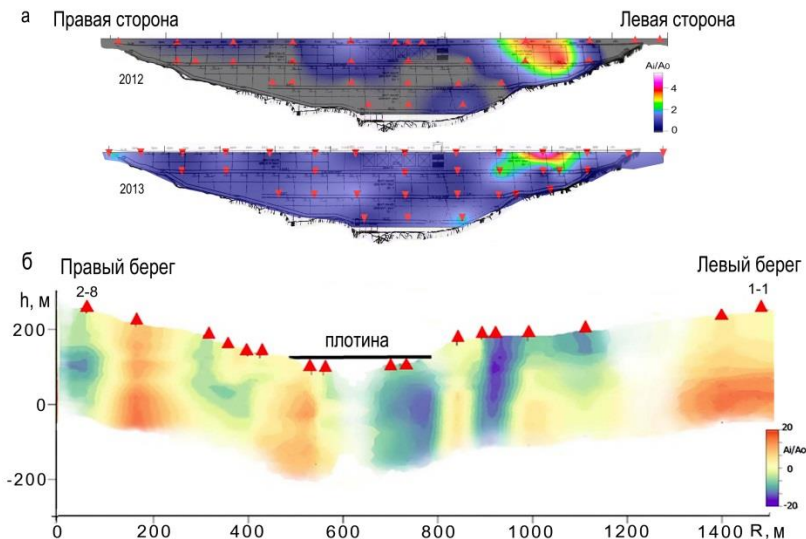


Рис. 4.5. Характерный пример спектра мощности микросейсм

Сигналы на этих частотах были выбраны для просвечивания плотины и грунтов района ее размещения. Учитывая непостоянство амплитуды сигналов, анализировалась относительная амплитуда, т.е. отнесенная к значениям в корреляционной точке (рис. 4.6).

Учитывая, что создаваемые добавочные деформации $\varepsilon = V_k/V$, где V_k – амплитуда колебаний, а V – скорость распространения, получаемая картина отражает напряженно-деформированное состояние объекта: однородному по прочностным свойствам материалу соответствует однородная пространственная картина, а аномалии – зонам измененных свойств. В правой части плотины присутствует яркая аномалия, характеризующая зону пониженной прочности, которая сохраняется при повторении исследований спустя год.

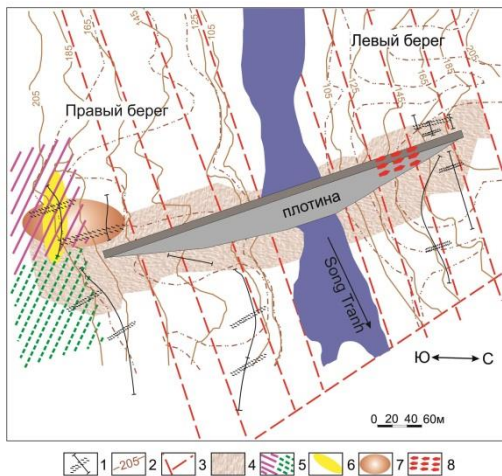


а – желто-красная область – ослабленная зона; б – разрез ММЗ по сводному профилю, отображающий скоростную дифференциацию верхней части земной коры, большие значения A_i/A_0 соответствуют низким значениям скоростей, т.е. более «слабым» породам основания сооружения

Рис. 4.6. Результаты просвечивания тела плотины промышленными сигналами в 2012 и 2013 гг. (а) в сопоставлении с данными по методу микросейсмического зондирования (б)

Для увеличения надежности результатов по обследованию верха разреза к методике просвечивания техногенными сигналами привлекались пассивные и активные сейсмические методы: микросейсмического зондирования (ММЗ) (Горбатилов, Цуканов, 2011), автокорреляционных функций (Schuster et al., 2004), многоканального анализа поверхностных волн (Park et al., 1999), инженерной сейсморазведки (Гурвич, Боганик, 1980). Комплексирование осуществлялось на этапе интерпретации путем анализа и сопоставления результатов применения отдельных методов (рис. 4.7). Результаты показывают, что ослабленное основание плотины Song Tranh-2 в районе правого борта водохранилища вызывает изменение напряженно-деформированного состояния в конструкции плотины. Снижение прочности проявляется в виде системы трещин в левой части плотины.

Выявить особенности работы конструкции плотины при разных деформационных свойствах основания правого и левого берегов позволил расчет деформирования для конечно-элементной расчетной модели плотины под действием собственного веса и бокового пригруза воды в программе ЛИРА® (рис. 4.8). Анализ картины напряжений в теле плотины в вертикальной плоскости показывает, что в верхней части конструкции вблизи правого бортового примыкания наблюдается зона сжатия, а у левого – растяжения.



1 – зоны трещиноватости на профилях по данным малоглубинной сейсмореазведки;
 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)

Рис. 4.7. Результаты обследования плотины и района ее размещения согласно комплексу сейсмических методов

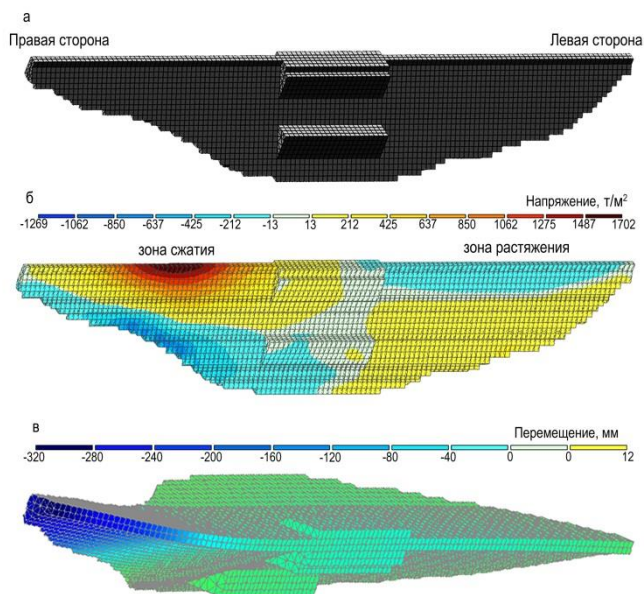


Рис. 4.8. Результаты конечно-элементного моделирования состояния дамбы: а – модель, б – поля напряжений в вертикальной плоскости, в – перемещения в горизонтальной плоскости (вид сверху)

Учитывая, что железобетонные конструкции хорошо работают при сжатии и существенно хуже при растяжении, можно предположить, что в зоне растяжения может наблюдаться деградация материала плотины, вплоть до микротрещин.

Сравнение с данными сейсмического обследования (рис. 4.6а), показывает, что зона растяжения приходится на участок аномальных свойств в теле плотины. Отметим, что моделирование подтвердило наше предположение о подвижности правого края плотины, причем именно в сторону верхнего бьефа (рис. 4.8в), где выделена ослабленная зона по результатам применения комплекса сейсмических методов (рис. 4.7). Таким образом, представлена методика обследования ответственных объектов в районах с высоким уровнем техногенного шума. Комплекс сейсмических методов позволяет оперативно получать данные о состоянии сооружения, грунтов основания и дает основу для дальнейших мероприятий по обеспечению его целостности.

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. Требуется новые исследования, выполнение которых возможно с использованием современной аппаратурно-методической базы с подключением разработанных методик, основанных на анализе сейсмического поля. Это позволяет:

1. Получать сведения об изменении деформационных свойств материалов (строительных и горных пород) еще до визуального проявления дефектов.

2. 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 позволяет выявить причину появления дефектов.

3. Получать реальную модель работы конструкций, в том числе ее сочленения с геологической средой.

4. 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.

5. Предотвращать чрезвычайные ситуации на ранней стадии их возникновения.

Глава 5. Сейсмические способы обследования антропогенных объектов различного назначения

Задачи системы сейсмического мониторинга сооружений можно разделить на две категории: обеспечивающие безопасность уже существующего объекта и при проектировании на стадии выбора конструктивного решения. Другой важный результат – новые представления о работе конструкций объекта совместно с окружающей средой (*Катценбах и др., 2003; Николаев и др., 2005; Таракановский и др., 2010*). Эти возможности решения научных и прикладных задач показаны на примерах сейсмического мониторинга ряда объектов. Остановимся на некоторых.

Верификация расчетной модели. Оценка сейсмических воздействий. Обе задачи актуальны для строительной практики. Часто важно заранее (до завершения строительства или при воздействиях извне) предвидеть картину распределения напряжений. В диссертации рассматриваются: оценка добавочных деформаций при выполнении свайных полей вблизи исторических зданий и оценка сейсмических воздействий на храм. Рассмотрим второй случай, где решались обе задачи.

Работа выполнялась для оценки воздействия метрополитена на строящийся храм современной архитектуры в Сретенском монастыре в г. Москве. Это крупное

железобетонное сооружение, для которого существенно получение адекватной расчетной модели. Заметим, что по опыту мониторинга зданий расчетные и наблюдаемые поля деформаций конструкций хорошо согласуются (Вознюк и др. 2010), т.е. теоретические модели работы элементов адекватны реальности, но картина пространственного распределения нагрузок может меняться в зависимости 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). Верификация модели может осуществляться после окончания строительства по совпадению наблюдаемых и расчетных собственных частот. Другая возможность – при использовании методики тестовых воздействий на ранней стадии строительства методом подбора определить параметры закрепления модели в грунте. Это позволит своевременно уточнить конструктивные решения.

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 наблюдаемыми величинами, тем самым проводят верификацию модели. На примерах акселерограмм для разных районов РФ показано, как для выяснения реакции на сильное сейсмическое воздействие проводится масштабирование относительно техногенных микросейсм (по акселерограммам или спектрам).

Наблюдения велись во время строительства храма в Сретенском монастыре при выходе на первые надземные отметки (+6.100 м). Акселерограмма, принятая к расчету (одновременный проезд двух поездов метро), и спектры мощности (рис. 5.1) показывают, что основное воздействие метрополитена приходится на диапазон частот 10-20 Гц.

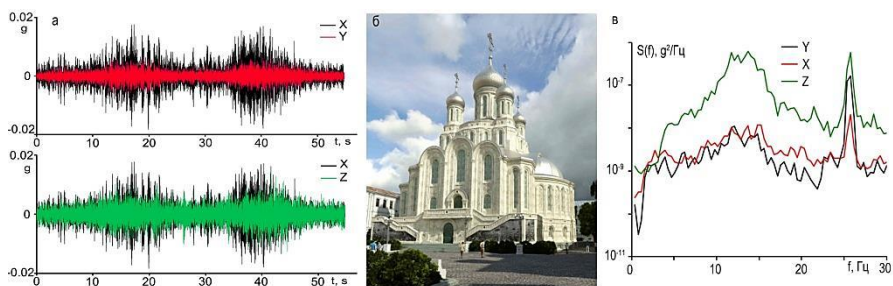


Рис. 5.1. Проект храма (фото) и параметры сейсмических воздействий: а – акселерограммы по компонентам X, Y, Z; в – спектры мощности

Верификация модели проводилась путем сравнения результатов расчетов (перемещений) и экспериментальных замеров (пересчет ускорений в перемещения) для модели «усеченного» здания, соответствующего состоянию строительства на момент измерений. Сравнение величин перемещений показывает очень хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений (табл. 5.1), что подтверждает правильность модели и строительных расчетов. Таким образом, оценка с использованием тестового сигнала позволяет получить реальную расчетную модель с уточнением взаимодействия конструкции и грунтов основания.

Таблица 5.1. Экспериментальные и расчетные значения перемещений

Отм., м	A _{эксп} , мм			A _{расч} , мм		
	Y	X	Z	Y	X	Z
-5.150	0.03	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01
+6.100	0.18	0.10	0.01	0.15	0.08	0.01

Оценка уровня вибраций, создаваемых железнодорожным транспортом.

Отклик среды на вибрационные воздействия может усиливаться или снижаться в зависимости от физико-механических свойств и строения грунтов, от состояния фундамента сооружения и его сочленения с грунтами и пр. Решение о необходимости установки, к примеру, виброзащиты должно подтверждаться в первую очередь экспериментальными измерениями уровня воздействий, что индивидуально для каждого сооружения. Ключевым моментом является создание расчетной модели, максимально отражающей реальное состояния объекта.

Результаты сейсмических наблюдений динамики обследуемого объекта (построение основных форм собственных колебаний), его отклика на техногенные воздействия, задаваемые в виде акселерограмм, обследования грунтов оснований – в все это отображает реальное состояние сооружения. Далее, методом подбора параметров, можно получить расчетную модель, наиболее приближенную к действительности. Затем оценивается вклад тех или иных воздействий на сооружение и, тем самым, целесообразность принятия решений по реконструкции. Отметим трудоемкость данной работы (по сравнению с традиционным экспертным мнением), поэтому пока ее рекомендуется использовать для избранных объектов.

В диссертации в качестве примера применения методики рассматривается оценка вклада вибрации на состояние архитектурного памятника (Спасо-Прилуцкий Димитриев монастырь, г. Вологда) от железнодорожного транспорта (рис. 5.2). Южное прясло (стена) монастыря имеет сильный крен в сторону внутреннего двора и серию крупных трещин, расположенных близко к башням. На расстоянии порядка 170 м от прясла проходит магистраль Северной железной дороги. Вдоль западной стены монастыря протекает р. Вологда. Вибрации от проходящих поездов осязательны даже без специальных средств измерений. По полученным параметрам собственных колебаний (рис. 5.2) была создана модель.

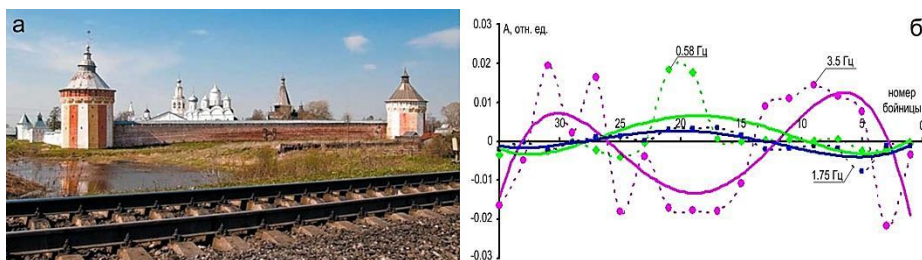
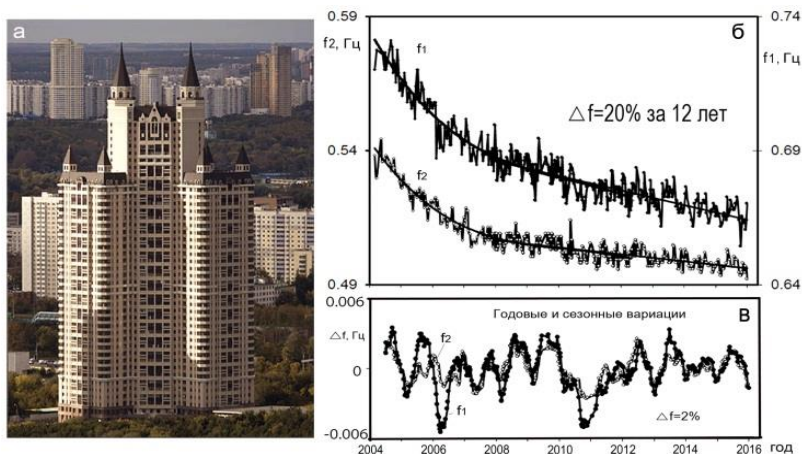


Рис. 5.2. Вид Спасо-Прилуцкого Димитриевского монастыря со стороны железнодорожного полотна (а) и экспериментальные формы собственных колебаний на частотах 0,58, 1,75 и 3,5 Гц (б). Линии с точками – профиль формы по точкам наблюдений, сплошная – полиномиальное сглаживание. Перемещения показаны в зависимости от номера бойницы, 0 – башня у реки

Затем при приложении акселерограммы от поезда были выполнены статические и динамические расчеты, согласно которым максимальное перемещение при прохождении поезда равно 10 мкм в центре прясла. Нагрузки достаточно малые, порядок усилий, полученных в стене: $-10^{-2} \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2$, что значительно меньше нагрузок от собственного веса конструкций и временных нагрузок.

Основная причина развития трещин, отклонения от вертикали и изменения линейности по горизонтали определяется взаимодействием стены с грунтами основания, в частности пространственным изменением их свойств, выявленных нами при сейсморазведке. Вибрации от железнодорожного транспорта в данном случае не оказывают воздействия, способного привести к разрушению прясла, т.е. установка виброзащиты не рекомендуется.

Высотные здания: опыт сейсмического мониторинга. Пример иллюстрирует чувствительность системы сейсмического мониторинга. На рисунке 5.3 приведены результаты мониторинга собственных частот f_1 и f_2 (по разным осям плана) колебаний высотного 44-эт. здания «Эдельвейс» в Москве. Регистрация ведется раз в 10 дней по 2-3 часа с 2004 г. по настоящее время. Помимо тренда временного хода частот, связанного в основном с ползучестью бетона, 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; *б* – кривые временного хода частот; *в* – те же кривые после фильтрации и снятия тренда

Рис. 5.3. Результаты мониторинга собственных частот f_1 и f_2 (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.

Экспресс-метод обследования жилых зданий в зоне разрушительных землетрясений. Пример 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 (рис. 5.4).

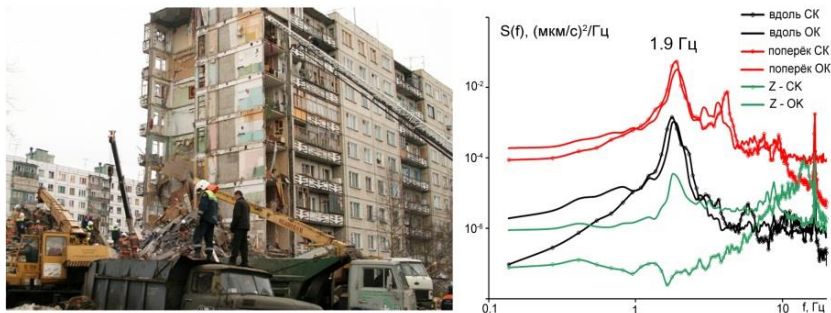


Рис. 5.4. Исследования разрушенного здания в г. Архангельске: фото аварийного дома (слева) и спектры мощности записей колебаний на 9 этаже в разрушенном (СК) и целом (ОК) зданиях (справа)

В тот момент 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. Для сравнительного анализа было обследовано целое здание этой же строительной типовой серии, стоящее рядом на сходных грунтах. Сравнение спектров мощности обоих зданий (рис. 5.4) 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.

Глава 6. Перспективы развития систем сейсмического мониторинга на Крайнем Севере

Освоения природных ресурсов Арктики стимулировало реализацию проектов транспортного обеспечения, например, наращивание грузоперевозок по Северному морскому пути (СМП), запущен проект по созданию железнодорожной магистрали «Северный широтный ход», которая соединит Северную железную дорогу со Свердловской. В этой связи одной из актуальных задач является обеспечение безопасности функционирования соответствующих объектов.

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, торосистость льда. Сейсмическая изученность в районе прохождения СМП увеличилась после открытия пункта сейсмических наблюдений на арх. Северная Земля в ноябре 2016 г. (рис. 3.2). 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.

Одним из путей обеспечения безопасности СМП является развертывание арктической сейсмической сети РФ путем установки новых сеймопунктов в дополнении к имеющимся станциям (см. гл. 3). 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.

Создание постоянно действующей системы сейсмического мониторинга необходимо вдоль Северного широтного хода (СШХ). Ветка железнодорожного полотна будет проходить по территории, которой присущи участки вечной мерзлоты, заболоченности, распространения карстовых процессов, что проявится в виде повышенной деформативности пути. Полевые методы исследования грунтов (статическое и динамическое зондирование) не позволяют выполнять постоянный (непрерывный) контроль земляного полотна и обнаруживать явление на ранней стадии его развития, это лишь разовая диагностика на опасных участках. Необходимо развитие новых технических решений и постоянно действующей системы мониторинга, в том числе адаптированной для условий Крайнего Севера. Сложность проблемы состоит в том, что пункты сейсмических наблюдений принадлежат разным ведомствам, оснащены аппаратурой разного типа, нет единого центра сбора данных и обработки арктических событий.

Информативность изучения верхней части разреза (ВЧР) земной коры может быть увеличена путем комплексирования различных сейсмических методов (см. гл. 4). Существенно, что для получения принципиально разнотипной информации о среде зарегистрированное волновое поле может параллельно обрабатываться

различными способами, опирающимися на разные «полезные» составляющие микросейсм (*Антоновская и др., 2017*). 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 объектов инфраструктуры. Открывается возможность регулировать скорость прохождения состава на неблагоприятных участках, оценивать максимальной допустимой массы состава и его длины, а также проверять качество выполненных ремонтных работ по укреплению земляного полотна.

Суть системы сейсмического мониторинга СШХ: создание стационарных сейсмических пунктов, нацеленных на выявление на ранней стадии негативных природно-техногенных изменений в ВЧР; оперативная передача информации в центр управления, автоматический анализ данных и определение уровня опасности участка. Эффективность технологии достигается сопоставлением натуральных наблюдений с базой данных параметров мониторинга. При выявлении развития неблагоприятной ситуации на участке устанавливается локальная система мониторинга, нацеленная на получение дополнительной информации о состоянии природно-техногенной системы, например, использование радиоволнового метода (*Задегидолова, Лопатин, 2014 и др.*).

Помимо решения задач мониторинга земляного полотна, в результате мы будем иметь линейные профили сейсмических сетей, это дополнительные сейсмические станции, данные которых необходимо подключать для задач сейсмического мониторинга Крайнего Севера, например, оценка регионального сейсмического режима. 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.

Пример создания комплексной системы сейсмомониторинга, но меньшего масштаба, был реализован при создании системы сейсмологического мониторинга Чиркейской ГЭС (см. гл. 2 и 4), что подтверждает реальность осуществления предложенной идеи.

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 научных 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» (<http://fciarctic.ru/index.php?page=geoss>). Расположение станций и аппаратное 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 сеймотектоническое структурирование Баренцевоморского региона – основа для оценки сейсмической опасности. Потребителями информации сейсмомониторинга 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 ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Патенты:

1. Патент RU 2242033 «Способ оценки и выбора участков территории для возведения сооружений различного назначения». Авторы: Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Хореев В.С., **Антоновская Г.Н.**, Шахова Е.В., 10.12.2004 г.
2. Патент RU 2365896 «Способ определения параметров физического состояния здания и/или сооружения». Авторы: Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., **Антоновская Г.Н.**, Шахова Е.В., Басакина И.М., Янович А.А., 27.08.2009 г.
3. Патент RU «Способ мониторинга возникновения недопустимой вибрации гидроагрегата вследствие гидродинамических пульсаций». Авторы: Капустян Н.К., **Антоновская Г.Н.**, Данилов А.В., Афонин Н.Ю. Поддержана заявка 22.06.2017. Рег. № 2017121727.

Руководства:

1. Руководство по методике комплексного инженерно-сейсмометрического и сейсмологического мониторинга состояния конструкций зданий и сооружений, включая площадки их размещения / Вводится впервые. Кол. авторов. Под ред. чл.-корр. РАН Ф.Н. Юдахина. М.: ИФЗ РАН, 2011. 36 с.

Монографии:

1. 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.
2. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. Кн. 2: Микросейсмичность. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 96 с.
3. Сейсмологические исследования в Арктических и приарктических регионах / Кол. авторов. Под ред. чл.-корр. РАН Ф.Н. Юдахина. Екатеринбург: УрО РАН 2011. 244 с.

Публикации в журналах из списка ВАК:

1. **Антоновская Г.Н.**, Басакина И.М., Конечная Я.В. Распределение сейсмичности и аномалий теплового потока Баренцевоморского региона // Геотектоника, 2018, № 1. С. 52-62.
2. Капустян Н.К., **Антоновская Г.Н.**, Басакина И.М. Опыт использования сейсмической регистрации вибраций от поездов для оценки состояния конструкций зданий и сооружений // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2017. Т. 76. № 5. С. 281-287.
3. **Antonovskaya G.N.**, Kapustyan N.K., Moshkunov A.I., Danilov A.V. & Moshkunov K.A. New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring. Journal of Seismology. Volume 21, Issue 5. 2017. Pp. 1039-1053
4. Gibbons S.J., **G. Antonovskaya**, V. Asming, Y.V. Konechnaya, E. Kremenetskaya, T. Kvaerna, J. Schweitzer, N.V. Vaganova. The 11 October 2010 Novaya Zemlya Earthquake: Implications for Velocity Models and Regional Event Location. Bulletin of the Seismological Society of America. 2016. 106 (4)
5. 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.

6. 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.

7. Рогожин Е.А., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Сейсмомониторинг гидротехнических сооружений: новые возможности отечественной разработки // Журнал «БСТ: Бюллетень строительной техники». № 10 (986). М.: Издательство «БСТ», 2016. С. 34-36.

8. Antonovskaya G., Konechnaya Ya., Kremenetskaya E., Asming V., Kvaerna T., Schweitzer J., Ringdal F. Enhanced Earthquake Monitorin European Arctic // Polar Science (2015), Volume 9, Issue 1, March 2015, pp. 158–167.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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: Информационный научно-технический журнал. №5 (184). 2014. с. 28-32 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.stroyamat21.ru/newtxt.htm>

14. 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.

15. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Пудова И.В. Сейсмометрические методы определения состояния сооружений и допустимых нагрузок от вибровоздействий // Жилищное строительство. № 9. М.: СТРОЙМАТЕРИАЛЫ, 2013. С. 30-33. (<http://rifsm.ru/u/fl/itm5994.pdf>)

16. Капустян Н.К., Климов А.Н., Антоновская Г.Н. Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании // Жилищное строительство. № 11. М.: СТРОЙМАТЕРИАЛЫ, 2013. С. 6-12.

17. 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.

18. Нго Тхи Лы, Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Данилов К.Б., Данилов А.В. Комплекс сейсмометрических методик для обследования гидротехнических сооружений // Жилищное строительство. № 10. М.: СТРОЙМАТЕРИАЛЫ, 2013. С. 36-45.

Подпись в печать 31.05.2018 г.
Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 2. Заказ 1403. Тираж 100 экз.
Отпечатано в ООО "Гефест"