

УДК 550.34

СЕТЬ КОМПЛЕКСНЫХ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕТРОПАВЛОВСК– КАМЧАТСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА: ЗАДАЧИ, СОСТАВ И ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА ИЗМЕРЕНИЙ, ГЛАВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗА 20 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Гаврилов В.А.¹, Дещеревский А.В.², Власов Ю.А.¹, Бусс Ю.Ю.¹, Морозова Ю.В.¹,
Полтавцева Е.В.¹, Федористов О.В.¹, Денисенко В.П.¹**

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
vgavr1403@mail.ru

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, г. Москва

Введение

Созданная к настоящему времени на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (ППП) уникальная сеть непрерывных комплексных скважинных измерений (далее – «Сеть») дает возможность проведения перспективных фундаментальных научных исследований в области изучения эндогенных процессов, связанных с подготовкой сильных землетрясений. Кроме этого Сеть является информационной основой системы средне- и краткосрочного прогноза сильных камчатских землетрясений Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН. Первый измерительный пункт Сети был создан в конце 1990-х годов на базе скважины Г-1, расположенной в черте г. Петропавловска-Камчатского. В этот период были организованы непрерывные скважинные геоакустические измерения на глубине 1035 м, дополненные в 2003 г. электромагнитными измерениями с подземной электрической антенной. Уже самые первые результаты показали, что геоакустические измерения, проводимые *in situ* в глубоких скважинах в сочетании с электромагнитными измерениями с подземными электрическими антеннами, позволяют получать научные результаты, недостижимые при измерениях на дневной поверхности. К таким результатам, в первую очередь, можно отнести открытие эффекта модулирующего воздействия слабых электромагнитных СНЧ полей на интенсивность геоакустической эмиссии горных пород [7, 20], а также установление и описание механизма указанного эффекта [3, 9, 21]. Указанные результаты легли в основу нового научного направления [6]. Следует также выделить разработку нового метода непрерывного мониторинга удельного сопротивления пород геосреды, базирующегося на использовании подземных электрических антенн [5].

В ходе многолетних измерений на ППП было установлено, что разработанные методы мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды, основой которых являются данные скважинных геоакустических измерений и измерений с подземными электрическими антеннами, могут с успехом использоваться в региональных системах среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений [6–9, 12, 18]. С января 2014 г. заключения о текущей сейсмической опасности для района г. Петропавловска-Камчатского, подготавливаемые лабораторией комплексного мониторинга сейсмоактивных сред ИВиС ДВО РАН на основе данных комплексных скважинных измерений, каждые две недели или чаще подаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, а также в Совет по прогнозу землетрясений и извержений вулканов ИВиС ДВО РАН.

Конфигурация Сети и состав измерений

В настоящее время в сеть комплексных скважинных измерений ППП входят пять радиотелеметрических пунктов, созданных на базе скважин Г-1, Р-2, Е-1, К-33, ГК-1, расположенных в радиусе 35 км от г. Петропавловска-Камчатского, и Центра сбора и обработки данных (ЦСОД), расположенного в здании ИВиС ДВО РАН в г. Петропавловск-Камчатский.

Основная информация о составе проводимых на базе указанных скважин измерений, представлена в таблице 1.

По результатам многолетних исследований наиболее информативными в рамках задач мониторинга НДС геосреды являлись измерения, проводившиеся на базе скважин Г-1, Р-2 и ГК-1. Остановимся на некоторых особенностях указанных скважин и составе проводимых на их базе измерений.

Таблица 1. Виды наблюдений на пунктах ПГП

Название скважины, координаты, глубина скважины, дата начала непрерывных измерений	Вид измерения; дата начала измерений
Г-1 , 53°03'N_158°37'48"E, 2540 м, август 2000 г.	1. Геоакустические, три компоненты, на глубинах более 1000 м: а) непрерывно с 04.08.2000 г. по июль 2003 г. на глубине 1035 м; б) непрерывно с октября 2009 г на глубине 1012 м; 2. Геоакустические (Z-компонента) на глубине 270 м – непрерывно с июля 2010 г. 3. Геоакустические (гидрофон) на глубине 200 м - февраль 2008 г. 4. Электромагнитные с подземной электрической антенной – непрерывно с мая 2003 г. 5. Электромагнитные с наземной антенной, каналы 30 Гц и 160 Гц – декабрь 2016 г.; каналы 560 Гц и 1200 Гц – июнь 2018 г. 6. Удельная электропроводность воды на глубине 41 м – май 2020г. 7. Температура воздуха в аппаратурном помещении – сентябрь 2007г.
Р-2 , 53°05'25"N_158°54'20"E, 1504 м, июль 2005 г.	1. Геоакустические (Z-компонента), измерения с пьезокерам. геофоном на глубине 300 м – июль 2006 г.; с гидрофоном на глубине 215м – июнь 2008 г. 2. Геоакустические (три компоненты) на глубине 730 м – октябрь 2010 г. 3. Электромагнитные с подземной электрической антенной – октябрь 2010 г. 4. Электромагнитные с наземной электрической антенной – июль 2019 г. 5. Давление на глубинах 3 м и 53 м – с ноября 2005 г. по февраль 2008 г.; затем с апреля 2014 г. 6. Температура воды на глубинах 3 м и 53 м – апрель 2014 г. 7. Уровень воды скважины: с дифференциальным датчиком давления - с октября 2006 г. по апрель 2008 г.; с датчиком давления воды на глубине 53 м и датчиком атмосферного давления – апрель 2014 г. 8. Атмосферное давление - с октября 2006 г. по апрель 2008 г.; затем с апреля 2014 г. 9. Температура воздуха отдельным датчиком в аппаратурном помещении - октябрь 2010 г.
Е-1 , 53°16'N_158°29'E, 3003 м, август 2011 г.	1. Геоакустические (три компоненты) на глубине 600 м – август 2011 г. 2. Электромагнитные с подземной электрической антенной – август 2011 г.
К-33 , 52°53'59"N_158°11'47"E, 300 м, ноябрь 2011 г.	1. Геоакустические (гидрофон) на глубине 210 м – ноябрь 2011 г. 2. Электромагнитные с подземной электрической антенной – ноябрь 2011 г.
ГК-1 , (самоизливающаяся, с дебитом воды около 0.1 л/с), 53°17'6.45"N_158°24'33.75"E, 1261 м, февраль 2016 г.	1. Измерения гидрофоном на глубине 280 м шумов дегазации – апрель 2018 г. 2. Измерения удельной электропроводности воды скважины на глубине 1 м – апрель 2018 г. 3. Измерения шумов дневной поверхности на глубине 0.5 м (геофон, вертикальная компонента), август 2018 г. 4. Измерения температуры воды скважины на глубинах 5 см и 7.5 м.

Скважина Г-1 расположена в разломной зоне Петропавловского горста, имеет глубину 2542 м, обсажена на всю глубину. В интервале глубин 1710–1799 м и 2530–2536 м имеется перфорация. После окончания бурения в 1987 г. дебит скважины в июне 1987 г. при самоизливе составлял около 0.3 л/с. Дебит постепенно снижался и в начале 1997 г. составлял около 0.002 л/с, а с сентября 1998 г. – не более 0.00015 л/с.

В непрерывном режиме пункт Г-1 начал функционировать в августе 2000 г. На начальном этапе на пункте проводились измерения геоакустической эмиссии (ГАЭ) с использованием скважинного трехкомпонентного геофона типа МАГ-3С [1], установленного на глубине 1035 м [7]. В 2003 г. в ходе исследований физических причин эффекта модулирующего воздействия слабых электромагнитных излучений на интенсивность ГАЭ на пункте начали проводиться электромагнитные измерения (ЭМИ) с подземной электрической антенной [5], а затем ряд других измерений (см. табл. 1).

На указанной скважине был получен основной объем данных по этим видам измерений, ставших основой наиболее важных научных результатов. При этом можно сделать вывод, что высокая эффективность измерений на скв. Г-1 явилась следствием удачного сочетания трех факторов: расположения скважины в хорошо развитой разломной зоне, ее значительной глубины и

оптимального выбора глубины установки основного геофона для проведения непрерывных геоакустических измерений.

Важность расположения измерительной скважины в развитой разломной зоне, в первую очередь, объясняется тем, что большинство методов мониторинга НДС геосреды, используемых на ПГП, ориентированы на мониторинг интенсификации процессов флюидизации геосреды, связанных с подготовкой землетрясений. По этой причине крайне важно, чтобы измерительные скважины были расположены в зонах с развитыми структурами активных разломов и имели с такими структурами хорошую гидравлическую связь. Как показывается в [17], именно таким зонам свойственна высокая динамичность фильтрационных процессов на заключительных этапах подготовки землетрясений.

Кроме этого эффективность геоакустических измерений существенно зависит от глубины установки геофона. Как показывают результаты исследований, измерения на глубинах более 300 м, позволяют значительно снизить влияние шумов дневной поверхности [14]. Однако при сложном геологическом строении участка скважины уровень шумов, а также чувствительность проводимых измерений к процессам подготовки землетрясений, может определяться и другими факторами. В частности, по данным одновременных геоакустических измерений геофонами на глубинах 270 м и 1012 м в скв. Г-1 было установлено, что по чувствительности к процессам подготовки землетрясений измерения на указанных глубинах очень сильно различаются. В этом случае имеет место высокая чувствительность измерений для глубины 1012 м и крайне низкая чувствительность для глубины 270 м. Физические причины таких результатов объясняются тем, что более глубокая зона измерений (глубины более 900 м), имеет хорошую гидравлическую связь с развитой разломной структурой ПГП, в то время как верхняя зона измерений с геофоном на глубине 270 м экранирована от разломной структуры полигона внедрением на интервале глубин 589–900 м диоритов экструзивного массива горы Мишенной [13].

Кроме геоакустических и электромагнитных измерений на скв. Г-1 ведутся измерения удельной электропроводности воды скважины. Такие же измерения с аналогичным комплектом аппаратуры проводятся и на скв. ГК-1.

Скважина Р-2 расположена в лесном массиве 20 км на северо-восток от скв. Г-1 на расстоянии около 4 км от береговой черты Авачинского залива. Скважина имеет глубину 1504 м, обсажена до глубины 768 м. Уровень воды находится на глубине около 21 м от дневной поверхности.

Ввиду значительного удаления скв. Р-2 от населенных пунктов спектр ЭМИ в зоне этой скважины определяется, в основном, электромагнитным излучением естественного происхождения. Это позволяет на базе скв. Р-2 проводить разработку методов мониторинга НДС геосреды, ориентированных на использование ЭМИ естественного происхождения. Для этой цели была создана высокочувствительная подземная антенна, основным конструктивным элементом которой является обсадная колонна скв. Р-2. Результаты, полученные с использованием указанной антенны, позволили показать принципиальную возможность использования естественного ЭМИ в системах мониторинга НДС геосреды, базирующихся на геоакустических и электромагнитных скважинных измерениях [10].

Кроме электромагнитных измерений с подземной антенной в настоящее время на скв. Р-2 проводятся непрерывные геоакустические измерения с использованием трехкомпонентного геофона, установленного на глубине 730 м, а также ряд других измерений (см. табл. 1), среди которых можно выделить непрерывные измерения давления и температуры воды в стволе скважины одновременно на двух глубинах. Результаты этих измерений используются для непрерывного мониторинга уровня воды и проницаемости геосреды. Основная идея, заложенная в метод мониторинга изменений проницаемости геосреды, применяемый на скв. Р-2, состоит в том, что изменения плотности воды скважины связаны (с поправкой на изменения температуры) с изменениями объема газов, поступающих в воду скважины из геосреды. В свою очередь, изменения объема газов определяются преимущественно изменениями проницаемости геосреды в районе скважины. Данные по изменениям плотности воды на скв. Р-2 получают расчетным путем, используя результаты непрерывных измерений давления и температуры воды в скважине на глубинах 3 м и 53 м. Указанный вариант метода мониторинга проницаемости геосреды позволил получить интересные научные результаты, связанные с подготовкой сильнейших Симуширских землетрясений (15.11.2006 г., $M_w = 8.3$; 13.01.2007 г., $M_w = 8.1$) [4]. Мониторинг уровня воды, который проводится на скв. Р-2 в непрерывном режиме с ноября 2005 г., также весьма эффективен в рамках задач мониторинга НДС геосреды. Амплитуды аномалий уровня воды, предшествующие сильным землетрясениям, достигают 53 см.

Скважина ГК-1 расположена в 35 км от г. Петропавловска-Камчатского, имеет глубину 1261 м, обсажена до глубины около 600 м. Сква. ГК-1 является самоизливающейся скважиной со среднесноголетним значением дебита около 0.1 л/с. Особенностью воды скважины является ее

достаточно высокая газонасыщенность (порядка 50 мл/л) с преобладанием в составе метана (до 90 %). Это позволяет использовать для мониторинга проницаемости геосреды оригинальный метод, базирующийся на измерениях шумов дегазации в воде скважины. Полученные к настоящему времени результаты указывают на перспективность использования этого метода в системе среднесрочного и краткосрочного прогноза камчатских землетрясений [12, 18]. На скв. ГК-1 также проводятся автоматизированные измерения удельной электропроводности воды скважины, аналогичные измерениями на скв. Г-1.

Техническое оснащение измерительных пунктов

Основным режимом функционирования измерительных пунктов (ИП) сети скважинных измерений ПГП является *режим непрерывного мониторинга*, при котором измерения ведутся непрерывно, а данные текущих измерений сохраняются в энергонезависимой памяти ИП для дальнейшей передачи по запросу из ЦСОД (в обычном режиме – ежесуточно в будние дни).

Обобщенная структурная схема аппаратного комплекса, используемого в настоящее время на ПГП для такого режима измерений, приводится на рис. 1.

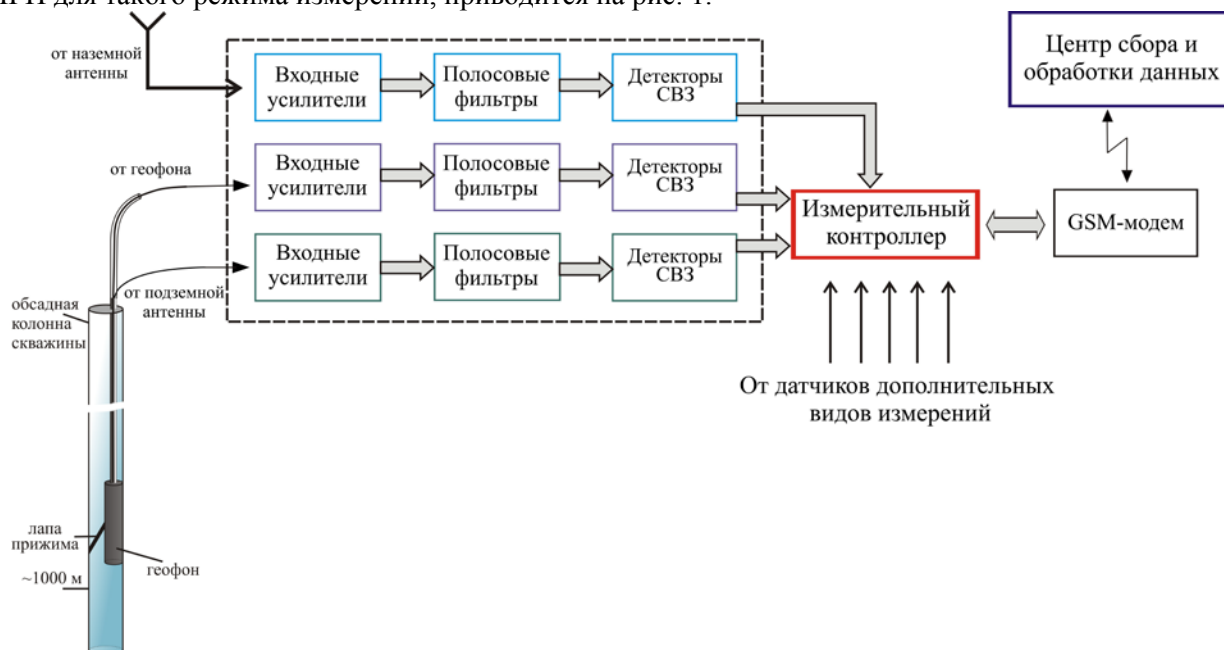


Рис. 1. Обобщенная структурная схема аппаратного комплекса сети скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона.

Конфигурация комплекса для конкретного ИП подбирается исходя из состава проводимых на пункте измерений. Основой комплекса является измерительный контроллер, в функции которого входит аналого-цифровое преобразование измеряемых сигналов, их цифровое осреднение, привязка данных к точному времени по UTC, а также хранение массивов обработанных данных для их дальнейшей передачи по каналу связи в ЦСОД. Подробные технические характеристики контроллера представлены в [2]. При необходимости организации большого числа измерительных каналов на пункте могут одновременно использоваться несколько контроллеров. В режиме непрерывного мониторинга исходные сигналы с выходов геоакустических датчиков и электрических антенн поступают на входы контроллера после аналоговой обработки с выделением средневыпрямленных значений (СВЗ) сигналов ГАЭ и ЭМИ (см. рис. 1). Использование такой схемы измерений связано с широкой (порядка 1.5 кГц) полосой исходных сигналов ГАЭ и ЭМИ. Аналоговая обработка сигналов ГАЭ и ЭМИ приводит к значительному (примерно к 2000-кратному) уменьшению объема данных, подлежащих передаче в ЦСОД, что позволяет использовать для их передачи доступные и дешевые каналы сотовой GSM-связи.

Геоакустические скважинные измерения

В настоящее время при проведении геоакустических измерений на ПГП используются скважинные аналоговые геофоны двух типов, а также аналоговые и цифровые гидрофоны.

Скважинные геофоны. С августа 2000 г. до сентября 2009 г. на ПГП в качестве основных геофонов применялись трехкомпонентные скважинные геофоны типа МАГ-3С с датчиками на основе

магнитоупругих кристаллических ферромагнетиков [1]. С сентября 2009 г. на ППП в качестве основных используются скважинные геофоны с пьезоэлектрическими датчиками – акселерометрами типа А1612 (производство ЗАО “Геоакустика”). Геофоны используются в трех- и однокомпонентном (Z-компонента) вариантах совместно с предварительными и линейными усилителями собственной разработки. Рабочий диапазон частот датчиков составляет 0.1–1000 Гц по уровню 0.7, номинальное значение коэффициента преобразования $1.0 \text{ В} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1}$. Среднеквадратическое значение собственных шумов датчиков в диапазоне 0.2–400 Гц не превышает $2 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. Необходимо отметить, что по чувствительности в области высоких частот (500–1200 Гц) геофоны с пьезоэлектрическими датчиками значительно уступают геофонам типа МАГ. Это связано с тем, что сигнал на выходе датчиков на основе магнитоупругих кристаллических ферромагнетиков, используемых в геофонах типа МАГ, пропорционален скорости ускорения, т.е. третьей производной от смещения. Соответственно в этом случае крутизна амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в рабочей полосе частот в пересчете на смещение составляет 60 дБ на декаду изменения частоты. Для пьезокерамических датчиков-акселерометров А1612 крутизна АЧХ составляет 40 дБ на декаду изменения частоты, что приводит в итоге к значительно меньшей (примерно на порядок) чувствительности измерений в области высоких (500–1000 Гц). В этой связи отметим, что измерения в 2001 г. с геофоном МАГ-ЗС позволили получить очень важные результаты, перспективные для целей краткосрочного прогноза сильных землетрясений в районе Авачинского залива. Наиболее интересные результаты были получены во временной окрестности роя сильных землетрясений в октябре 2001 г. для самых высокочастотных каналов (центральные частоты фильтров 560 Гц и 1200 Гц) [21]. Для повышения чувствительности сети скважинных геоакустических измерений к изменениям НДС в ближайшее время планируется на отдельных ИП возобновить использование геофонов МАГ-ЗС.

Электромагнитные измерения с подземными антеннами

В настоящее время на измерительных пунктах ППП используются подземные электрические антенны трех типов. Для измерений на пункте Р-2, в зоне которого электромагнитное излучение связано, в основном, с источниками естественного происхождения, используется подземная электрическая антенна типа «монополь», которая по своей конструкции, аналогична антенне, описанной в [19]. Результаты, полученные в ходе измерений на пункте Р-2, показали, что применение антенн подобного типа, благодаря присущей им высокой чувствительности, позволяет использовать для целей мониторинга НДС геосреды даже слабые ЭМИ естественного происхождения [10]. Применение подземных антенн, подобных по конструкции антенне типа «монополь», требует наличия значительной свободной площади вокруг скважины для размещения подземного рефлектора, а также проведения большого объема земляных работ. При нахождении вблизи скважины строений, дорог и т.п., такой вариант подземной антенны практически нереализуем. В этой связи авторами был разработан оригинальный вариант подземной электрической антенны, не требующий применения рефлектора [5]. Антенны этого типа используются для измерений на скважинах Г-1 и Е-1. Для получения корректных результатов по мониторингу удельного сопротивления геосреды при обработке данных измерений с подземными антеннами требуется учитывать изменения напряженности внешнего ЭМИ, воздействующего на геосреду в зоне скважины. Для этой цели измерительные пункты оснащаются аппаратурой для проведения наземных электромагнитных измерений. При этом измерения с наземными и подземными антеннами проводятся в одних и тех же частотных диапазонах. Результаты наземных измерений используются затем при обработке данных в ЦСОД.

Обработка данных электромагнитных измерений на измерительных пунктах аналогична описанной выше обработке исходных широкополосных сигналов ГАЭ.

На ИП сети также ведутся непрерывные **измерения различных служебных параметров**: температуры в помещениях пунктов, напряжений источников электропитания аппаратуры ИП, уровней собственных шумов измерительных трактов и другие измерения, которые относятся к служебным. Данные этих измерений используются при обработке временных рядов скважинных измерений для контроля условий измерений, что позволяет существенно повысить качество данных и уменьшить риск некорректной интерпретации результатов мониторинга [11, 16].

К настоящему времени наиболее широкий комплекс служебных измерений организован на ИП ГК-1. Кроме температуры воздуха и напряжений электропитания аппаратуры на данном пункте контролируются изменения температуры воды в самоизливающейся скв. ГК-1 на глубине 5 см (практически на изливе скважины) и на глубине 7.5 м. В качестве датчиков используются

термометры сопротивления РТ-100. Результаты этих измерений необходимы для компенсации суточных и сезонных вариаций данных гидрофона, установленного в скв. ГК-1 на глубине 280 м для измерений шумов дегазации воды скважины. Кроме этого на пункте ведется непрерывный мониторинг уровня шумов дневной поверхности. Для этой цели используется однокомпонентный (вертикальная компонента) геофон с пьезоэлектрическим датчиком типа А1612, установленный на глубине 0.5 м на расстоянии 30 м от скв. ГК-1. Получаемые при этом данные дают возможность при обработке данных шумов дегазации учитывать изменения в зоне скважины уровня шумов экзогенного происхождения.

Передача данных в ЦСОД и обработка данных

При спокойной сейсмической обстановке сеансы связи с ИП в будние дни организуются ежедневно, а в выходные и праздничные дни не реже, чем каждые двое суток. Передача данных, накопленных с момента предыдущего сеанса связи, осуществляется поочередно с каждого ИП по запросу из ЦСОД. Передача данных с ИП производится по каналам сотовой связи стандарта GSM. Благодаря значительному сокращению массива геоакустических и электромагнитных данных за счет их предварительной обработки время передачи суточного массива с одного пункта обычно не превышает четырех минут. В случае отказа канала связи контроллер обеспечивает продолжение измерений и регистрации данных в автономном режиме в течение месяца и более. Так, при одноминутном осреднении в памяти контроллера сохраняются результаты измерений за последние 51 сутки. Зарегистрированные данные могут быть считаны непосредственно на измерительном пункте с помощью портативного компьютера через интерфейс RS-232.

Принятые в ЦСОД очередные массивы данных измерительных пунктов автоматически вносятся в базу исходных данных, созданных в формате программного пакета WinABD [15]. Пакет WinABD обеспечивает хранение рядов данных многолетних комплексных геофизических измерений и работу с ними в единой программной среде. Наряду с данными скважинных измерений ПГП, в базу первичных данных загружаются и данные, получаемые из сторонних организаций.

По окончании сеанса связи дежурный оператор имеет возможность провести предварительный контроль внесенных данных, в том числе, оценить результаты последних измерений по служебным каналам ИП (напряжения на источниках питания и пр.). Также имеется возможность при необходимости дистанционно изменить настройки основных опций контроллеров ИП: установка текущего времени, интервала усреднения данных и др.

Дальнейшая работа с новыми данными предусматривает трехэтапный цикл их обработки с последующим присоединением к ранее накопленному массиву данных, который хранится в чистовой базе данных. Такой цикл включает в себя следующие действия по обработке временных рядов:

- устранение различных дефектов в данных;
- коррекция рядов при нештатных скачках среднего уровня и/или дисперсии сигналов, связанных, как правило, с изменением настроек или заменой блоков аппаратуры;
- устранение в рядах вариаций, связанных как с изменением температуры в помещении ИП, так и с иными помехами естественного и техногенного происхождения.

Таким образом, в базе данных сохраняются как первичные результаты измерений, так и ряды, прошедшие первичную обработку. Весь цикл обработки выполняется в среде пакета WinABD.

Основным режимом, используемым в Сети для геоакустических и электромагнитных измерений, является режим непрерывного мониторинга, при котором регистрируются только средневывраженные значения этих сигналов. Вместе с тем, для решения ряда задач, связанных, например, с изучением спектров и волновых форм, требуется также регистрация исходных широкополосных сигналов. В таких случаях в дополнение к режиму непрерывного мониторинга применяется *режим широкополосной автономной регистрации сигналов ГАЭ и ЭМИ*. Для этой цели используется измерительный цифровой модуль Zet220, позволяющий проводить высокоточные геоакустические и электромагнитные измерения с частотой дискретизации до 8 кГц с регистрацией данных на USB-флэш-накопитель (без передачи данных по каналу связи). Такие измерения проводятся сеансами продолжительностью от нескольких суток до нескольких месяцев.

Заключение

За 22 года функционирования Сети комплексных скважинных измерений ПГП был получен целый ряд важных научных результатов, относящихся к физическим причинам аномальных изменений параметров ГАЭ и ЭМИ во временных окрестностях сильных землетрясений, а также к

методам мониторинга и краткосрочного прогноза землетрясений [3, 6–9, 20, 21,]. Вместе с тем, по мнению авторов, главным результатом следует считать само создание указанной Сети.

В настоящее время сеть комплексных скважинных измерений ПГП можно рассматривать, во-первых, как непрерывно функционирующую и развивающуюся экспериментальную базу для изучения процессов подготовки сильных землетрясений в одном из самых сейсмоактивных регионов мира. Во-вторых, Сеть также является информационной основой, действующей в районе г. Петропавловска-Камчатского системы среднесрочного и краткосрочного прогноза сильных камчатских землетрясений.

Первую из двух этих задач можно условно отнести к числу фундаментальных, а вторую - к прикладным задачам. Однако фактически результаты, получаемые в рамках этих направлений исследований, в значительной мере взаимосвязаны. Так, например, открытие эффекта воздействия внешнего ЭМИ на интенсивность геоакустических процессов [7, 20] и исследование его физических причин [3, 8, 9, 21] оказало очень серьезное положительное влияние на развитие работ по среднесрочному и краткосрочному прогнозу камчатских землетрясений. И наоборот: результаты многолетних измерений с подземными антеннами [5, 22], организованные на ПГП, прежде всего, с целью развития методов прогноза землетрясений, позволили получить уникальные результаты о влиянии изменений удельного электрического сопротивления верхней части земной коры на параметры глобальной электрической цепи [18].

Очевидно, что данные, полученные в ходе рассматриваемых геоакустических и электромагнитных измерений и ставшие основой большого числа научных результатов, невозможно было бы получить при наблюдениях на поверхности. Проведение основной части измерений в достаточно глубоких скважинах, т.е. фактически *in situ*, является крайне важной особенностью созданной Сети.

Другой важной особенностью сети скважинных измерений ПГП является их комплексность. Касаясь состава проводимых на ПГП измерений отметим, что их выбор определялся, в первую очередь, задачей вероятностного краткосрочного прогноза времени сильнейшего ($M \geq 7.5$) неглубокого землетрясения в районе Авачинского залива. Успешные прогнозы ряда сильных камчатских землетрясений, сделанные на основе данных комплексных скважинных измерений, показывают, что в целом состав проводимых измерений и базирующиеся на них методы мониторинга НДС геосреды соответствуют решаемым задачам. Прежде всего, это относится к скважинным геоакустическим измерениям и электромагнитным измерениям с подземными электрическими антеннами, на основе которых удалось разработать высокоэффективные методы мониторинга НДС геосреды, не имеющие аналогов на отечественных и зарубежных сейсмопрогностических полигонах.

Благодарности

Работа выполнена по проекту № 0282-2019-0005 государственного задания ИВиС ДВО РАН и по проекту № 0144-2019-0011 государственного задания ИФЗ РАН.

Список литературы

1. Беляков А.С. Магнитоупругие акустические геофоны для геофизических исследований // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН, 2004. Вып. 40. С. 28–35.
2. Власов Ю.А., Гаврилов В.А., Денисенко В.П., Федористов О.В. Телеметрическая система сети комплексного геофизического мониторинга // Сейсмические приборы. 2008. Вып. 44. № 2. С. 32–38.
3. Гаврилов В.А. Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии // ДАН. 2007. Т. 414. № 3. С. 389–392.
4. Гаврилов В.А. Динамика микротрещиноватости геосреды в связи с катастрофическими Симуширскими землетрясениями 2006–2007 гг. по данным комплексных скважинных измерений на Камчатке // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Материалы докладов Всероссийской конференции. Т. 2. М.: ИФЗ, 2009. С. 295–302.
5. Гаврилов В.А. О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 3. С. 25–38.
6. Гаврилов В.А. Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 2017. 385 с.
7. Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 52–67.
8. Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Власов Ю.А., Денисенко В.П., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В., Федористов О.В. О прогнозе Южно-Камчатского землетрясения (28.02.2013 г., $M_w=6.8$) по данным

комплексных скважинных геофизических измерений // Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. Гл. 11. С. 136–138.

9. Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В. Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // Физика Земли. 2014. № 1. С. 89–103.

10. Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Децеровский А.В., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В. Мониторинг состояния геосреды на основе синхронных геоакустических и электромагнитных скважинных измерений: использование естественного электромагнитного излучения // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 4. С. 41–57.

11. Гаврилов В.А., Децеровский А.В., Полтавцева Е.В., Сидорин А.Я. Технологии предварительной обработки данных комплексного геофизического мониторинга и опыт их применения в системе геоакустических наблюдений на Камчатке // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 4. С. 57–75.

12. Гаврилов В. А., Морозова Ю.В., Децеровский А.В., Бусс Ю.Ю., Пантелеев И.А. Отражение процесса подготовки сильного близкого Жупановского землетрясения в данных комплексных скважинных измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы V Международной конференции, Москва, 04–07 июня 2019 г. / под. ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. 2019. С 38–44.

13. Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Бусс Ю.Ю., Полтавцева Е.В. Результаты одновременных геоакустических измерений на разных глубинах в скважине Г-1: связь с особенностями геологического строения околоскважинного пространства // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 29–30.03.2021 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С 83–86.

14. Гальперин Е.И., Нерсесов И.Л., Воровский Л.М. и др. Изучение сейсмического режима крупных промышленных центров. М.: Наука, 1978. 188 с.

15. Децеровский А.В., Журавлев В.И., Никольский А.Н., Сидорин А.Я. Программный пакет ABD – универсальный инструмент для анализа данных долговременных наблюдений // НТР. 2016. Том 95. № 4. с.35–48. DOI: 10.21455/std2016.4-6.

16. Децеровский А.В., Сидорин А.Я., Фаттахов Е.А. Комплексная методика описания и фильтрации экзогенных эффектов в данных мониторинга, учитывающая вид наблюдений и дефекты экспериментальных данных // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98. № 2. С. 25–60. DOI: 10.21455/std2019.2-2.

17. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2015. 328 с.

18. Bogdanov V., Gavrilov V., Pulnits S., Ouzounov D. Responses to the preparation of strong Kamchatka earthquakes in the lithosphere–atmosphere–ionosphere system, based on new data from integrated ground and ionospheric monitoring, E3S Web Conf., 196 (2020) 03005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019603005>.

19. Fujinawa Y., Takahashi K., Tomizawa I. Characteristics of casing-pipe antennas // Techn. Note Nat. Res. Inst. Earth Sci. and Disaster Prev. 1995. N. 166. P. 83–94.

20. Gavrilov V., Bogomolov L., Morozova. Yu., Storcheus A. Variations in geoacoustic emissions in a deep borehole and its correlation with seismicity // Annals of Geophysics. V. 51. N. 5/6. October/December 2008. P. 737–753.

21. Gavrilov V.A., Naumov A.V. Modulation of geoacoustic emission intensity by time-varying electric field // Russian Journal of Earth Sciences. 2017. V. 17. N 1. P. 1–9.

22. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Deshcherevskii A.V., Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A. Stress-strain state monitoring of geological environment based on multi-instrumental measurements in boreholes: Experience from of the studies at Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic testing site (Kamchatka, Russia) // Pure and Applied Geophysics (2020). V. 177. N 1. P. 397–419.