

УДК 550.3, 551.521.1, 550.4, 004.942

Результаты комплексных сейсмологических, геофизических и геохимических исследований на территории Республики Дагестан в 2016–2020 гг.

©2021 г. Х.Д. Магомедов¹, Д.Г. Таймазов^{1,2}, З.А. Адилов¹, М.Г. Магомед-Касумов^{1,3}

¹ДФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Махачкала, Россия; ²ИГ ДФИЦ РАН, г. Махачкала, Россия;

³ДФИЦ РАН, г. Махачкала, Россия

Поступила в редакцию 19.02.2021 г.

Аннотация. Описаны выполненные в Дагестанском филиале ФИЦ ЕГС РАН за последние пять лет исследования и разработки, в основном инновационного характера. К этим разработкам относятся: программа для ЭВМ «Построение передаточной функции между временными рядами по относительным амплитудам когерентных гармоник»; изобретение «Способ реконструкции динамических процессов в земной коре по сейсмическим наблюдениям», реализованное в компьютерной программе «Реконструкция геодинамических процессов по сейсмическим наблюдениям»; программа SEISMO; изобретение «Способ прогнозирования тектонических землетрясений», реализованное в компьютерной программе «Определитель параметров деформационных аномалий в земной коре по площадным наблюдениям геополей»; программа для ЭВМ «Построитель карт регистрационных возможностей сетей сейсмостанций». Их внедрение обеспечило получение научных результатов приоритетного характера, основными из которых являются выявление значимой корреляции временных рядов наблюдений концентраций и дисперсий концентраций водорода и гелия с сейсмическим режимом региона; установление доминирования в вариациях атмосферного давления и в отклике на них уровней воды в скважинах полусуточной гармоника, в то время как во внутрисуточных колебаниях слабой сейсмичности доминирует 24-часовая гармоника, что однозначно исключает атмосферное давление из возможных причин суточных вариаций сейсмичности; корреляция синхронных пиков во временном ходе амплитуд внутрисуточных гармоник в температурных наблюдениях в скважине с сильнейшими землетрясениями мира; установление факта модуляции слабой сейсмичности полусуточной приливной волной M_2 ; выделение в вариациях слабой сейсмичности наряду с суточной гармоникой S_1 (24 ч) устойчивых внутрисуточных гармоник S_2 (12 ч), S_3 (8 ч) и S_4 (6 ч). Описан также ряд приоритетных результатов, полученных в сотрудничестве с Сейсмологическим филиалом ФИЦ ЕГС РАН и Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

Ключевые слова: сейсмические наблюдения, прогноз, деформационные аномалии, регистрационные возможности, дисперсия, гармоники, модуляция.

Для цитирования: Магомедов Х.Д., Таймазов Д.Г., Адилов З.А., Магомед-Касумов М.Г. Результаты комплексных сейсмологических, геофизических и геохимических исследований на территории Республики Дагестан в 2016–2020 гг. // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 2. – С. 67–85. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.04>

Введение

Дагестанский филиал (ДФ) ФИЦ ЕГС РАН проводит работы по нескольким темам Программы ФНИ РАН п. 136 «Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий». Объектами исследования являются сейсмические процессы на глобальном и региональном уровнях, а также связанные с проявлени-

ниями сейсмичности вариации геофизических, геохимических и геодинамических параметров, преимущественно на территории Восточного Кавказа. Для этого задействована региональная сеть сейсмических станций и пунктов геофизического и геохимического мониторинга.

Основное направление повышения информативности наблюдательной сети – это регулярное переоснащение пунктов сейсмологического, геофизического и геохимического мониторинга современным оборудованием и внедрение

новых технологий систематизации, архивирования и актуализации наблюдательных данных. Немаловажную роль играют в этом и разработка новых средств наблюдения и методов обработки данных, разработка и внедрение новых компьютерных программ, а также новых подходов к интерпретации результатов. Исходя из этого, в статье описываются в основном прошедшие государственную регистрацию и подготовленные к представлению в Роспатент результаты инновационной деятельности (РИД) сотрудников ДФ ФИЦ ЕГС РАН за последние пять лет и полученные на их основе результаты приоритетного характера.

Для удобства изложения все РИД описываются в первом разделе. Второй раздел посвящён сейсмологическим наблюдениям и обработке результатов, в том числе и с использованием новых алгоритмов и программ. В третий раздел включены описания результатов обработки геофизических и геохимических наблюдений по новым алгоритмам и компьютерным программам и интерпретация результатов обработки, а также описание перспектив реализации и использования некоторых запатентованных аппаратных разработок. В четвёртом разделе описаны результаты прикладных исследований, выполненных совместно с Сейсмологическим филиалом (СФ) ФИЦ ЕГС РАН, в результате которых впервые в натурном эксперименте определены собственные частоты и построены детальные формы колебаний плотины Чиркейской ГЭС в Дагестане.

Практическая значимость полученных результатов обусловлена тем, что на сейсмоопасной территории Дагестана располагается большое количество важных объектов промышленного и социального назначения, повреждение или разрушение которых в случае сильного землетрясения может привести к серьёзным катастрофическим последствиям. Поэтому чрезвычайно важно получение и предоставление заинтересованным организациям достоверных и своевременных данных о сейсмических событиях на этой территории и о состоянии инженерных сооружений.

1. Разработка новых методов, программ обработки данных и средств наблюдения в Дагестанском филиале ФИЦ ЕГС РАН

1.1. Разработана программа для ЭВМ «Построение передаточной функции между временными рядами по относительным амплитудам когерентных гармоник» [Таймазов, Шарпудинов

и др., 2016]. Программа предназначена для исследования сложных динамических систем путём анализа пространственно-временных изменений передаточных функций между параметрами взаимосвязанных процессов, заданными в виде временных рядов. В ней используется метод относительных амплитуд отклика (ОАО), численная реализация которого включает в себя следующие шаги: 1 – удаление трендовой составляющей; 2 – гармонический анализ введённых временных рядов с использованием оконного преобразования Фурье; 3 – определение с заданной дискретизацией относительных амплитуд когерентных гармоник (отношение амплитуд отклика и динамического воздействия) и составление временного ряда ОАО; 4 – гармонический и корреляционный (с другими геофизическими временными рядами) анализ полученного ряда ОАО, выявление в нём динамических характеристик исследуемой системы.

Программа может быть использована, например, для совместной обработки гидрогеодинамических и барометрических наблюдений с целью изучения изменения во времени напряжённо-деформированного состояния (НДС) земной коры на заданной территории и выявления предвестников сейсмических событий. Совместная обработка с помощью этой программы барометрических и гидрогеодинамических наблюдений на трёх скважинах в Дагестане показала, в частности, что как в вариациях атмосферного давления, так и в отклике на них уровней воды в скважинах доминирующей гармоникой является полусуточная волна S_2 – её амплитуда в несколько раз превышает амплитуду суточной волны S_1 . Этот факт будет использован нами далее при анализе слабой сейсмичности (см. пункт 3.3).

1.2. Разработано и зарегистрировано в Роспатенте изобретение «Способ реконструкции динамических процессов в земной коре по сейсмическим наблюдениям» [Таймазов Д., Таймазов М., 2018б], согласно которому с использованием сейсмического каталога и известных эмпирических соотношений между энергетическими и пространственно-временными характеристиками землетрясений строится непрерывный график временного хода условной накопленной сейсмической энергии (УНСЭ) в земной коре, который можно оцифровать с любой заданной дискретизацией. Это позволяет исследовать стохастический по своей природе сейсмический процесс с использованием известных методов анализа равномерных временных рядов. Способ реализован в компьютерной программе «Реконструкция

геодинамических процессов по сейсмическим наблюдениям» [Таймазов, Шарпудинов и др., 2018] и апробирован на региональном каталоге землетрясений Восточного Кавказа и на Гарвардском каталоге (Калифорния (США), Новая Зеландия). Результаты приведены в разделе 3 настоящей статьи. Разработки направлены на отображение в реальном времени динамики накопления сейсмической энергии и/или напряжений в земной коре и используются в деятельности Дагестанского филиала ФИЦ ЕГС РАН (акт о внедрении от 20.08.2018 г.). Количественные оценки изменений во времени накопленной в земной коре сейсмической энергии, выдаваемые программой на основе сейсмического каталога и позволяющие оценить также накопленные напряжения, могут способствовать выявлению деформационных предвестников землетрясений.

1.3. Разработано и зарегистрировано в Роспатенте изобретение «Способ прогнозирования тектонических землетрясений» [Таймазов Д., Таймазов М., 2018а], в котором предусмотрено последовательное определение места, силы и времени сильных тектонических землетрясений. Сущность способа заключается в проведении площадных режимных наблюдений геофизических полей, напрямую связанных с НДС земной коры на сейсмоактивной территории, путём обработки которых на ЭВМ определяют координаты очага ожидаемого землетрясения, с использованием при этом теоретической закономерности площадного распределения предвестниковых деформационных аномалий.

Из наблюдений, выполненных как минимум для двух эпох, разделённых временным интервалом в несколько лет, определяют текущие радиусы зоны подготовки землетрясения и скорость накопления сейсмической энергии в очаговой зоне (ОЗ), а по эмпирической формуле, связывающей магнитуду землетрясения со скоростью накопления сейсмической энергии, определяют магнитуду ожидаемого землетрясения. Время, оставшееся до прогнозируемого землетрясения, предполагается определять по совокупности известных теоретических и эмпирических соотношений.

1.4. Для реализации изобретения по п. 1.3 в 2016 г. разработана и зарегистрирована в Роспатенте компьютерная программа «Определитель параметров деформационных аномалий в земной коре по площадным наблюдениям геополей» [Таймазов, Сиражудинов, Кадиев, 2016]. Программа апробирована на тестовых данных. Для апробирования программы на реальных наблюдательных данных подготовлены результаты мно-

голетних GPS-наблюдений по 800 станциям на территории штата Калифорния (США). Произведена загрузка данных наблюдений с GPS-станций из архивов за последние 20 лет, полученных по запросу на официальном сайте UNAVCO (<http://www.unavco.org/>). Каждая запись содержит среднесуточное смещение контрольной точки по трём координатам, а также стандартное отклонение по каждому направлению.

1.5. Разработана и зарегистрирована в Роспатенте программа для ЭВМ SEISMO [Панатов, Адиллов, 2019]. Программа предназначена для определения параметров землетрясений с использованием разных методов по временам пробега продольных t_p , поперечных t_s и фиктивных t_{s-p} сейсмических волн, а также для формирования баз данных параметров обработанных землетрясений и позволяет представлять результаты определения параметров землетрясений в удобных для анализа сейсмологической информации формах. Она апробирована на региональном каталоге землетрясений Восточного Кавказа. Программа введена в эксплуатацию — каталоги землетрясений и бюллетени в Дагестанском филиале ФИЦ ЕГС РАН формируются с использованием данной программы. Вид окон работы программы с базой данных землетрясений приведён на рис. 1.

1.6. Разработана, зарегистрирована и внедрена в эксплуатацию программа «Построитель карт регистрационных возможностей сетей сейсмостанций» [Магомед-Касумов и др., 2020], предназначенная для автоматической генерации карт регистрационных возможностей сетей сейсмических станций по заданным параметрам сейсмостанций. Программа позволяет осуществлять построение визуальной карты, наглядно отображающей дальности регистрации землетрясений заданных энергетических классов сетью сейсмостанций. Она может применяться в деятельности организаций, осуществляющих мониторинг сейсмического режима.

Функциональные возможности программы: задание параметров станций сети (координат и дальностей регистрации землетрясений заданных энергетических классов), выбор карты-подложки для более наглядной демонстрации результатов обработки. Апробирована на сети сейсмостанций Дагестанского филиала ПАО РусГидро и ДФ ФИЦ ЕГС РАН (рис. 2).

1.7. Разработан алгоритм прогнозирования землетрясений по сейсмическим наблюдениям [Таймазов, 2021], основанный на масштабной инвариантности сейсмического процесса. Он предполагает выявление по каталогу

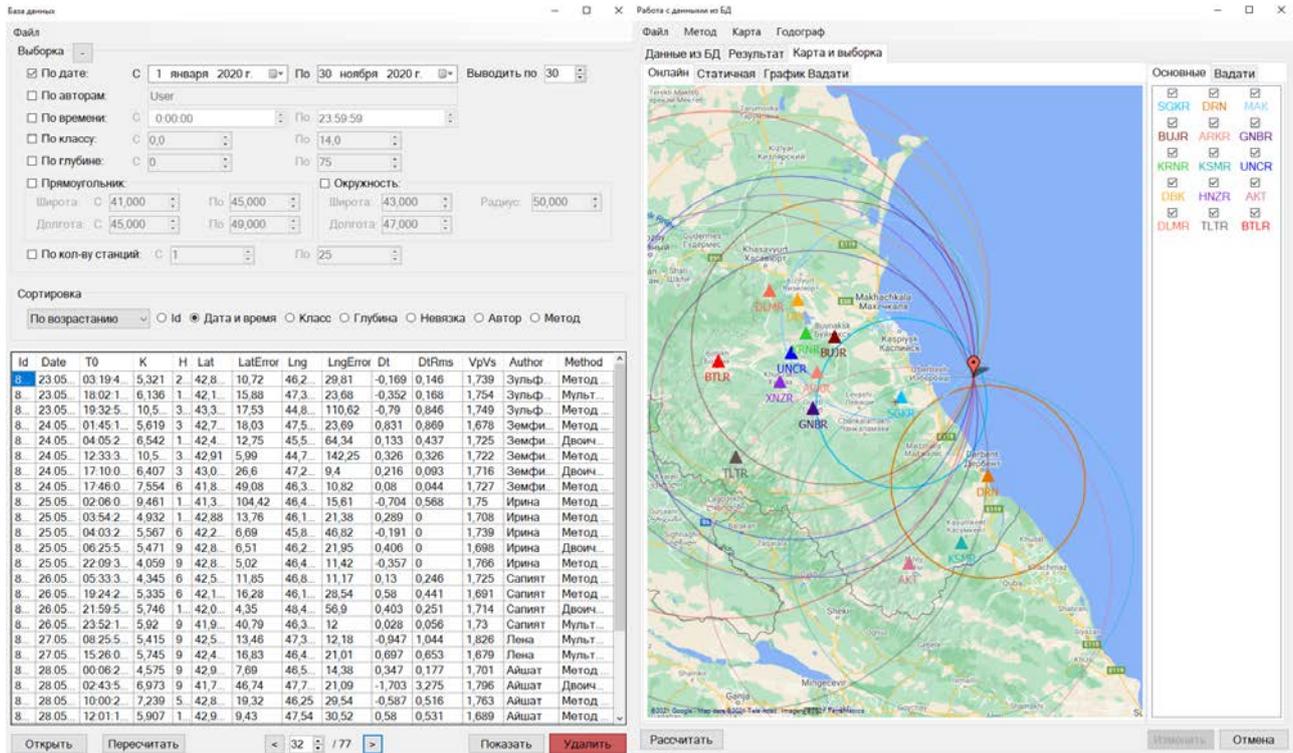


Рис. 1. Вид окон работы с базой данных землетрясений

и известным эмпирическим соотношениям набора масштабно независимых параметров (вектора признаков), характеризующих зоны подготовки землетрясений в течение их сейсмических циклов, с использованием для этого слабых и средних по силе событий, тестирование этого набора признаков на прошедших сильных землетрясениях (ретропрогноз) и использование результатов для прогнозирования на будущее.

Прогнозирование землетрясений по предлагаемому алгоритму включает в себя выбор контролируемой территории достаточно больших размеров, на которой проводились многолетние сейсмические наблюдения, формирование из каталога выборки землетрясений средней силы, произошедших за всё время инструментальных наблюдений, определение по слабым землетрясениям, произошедшим в областях их подготовки, средних механизмов очагов и азимутов главных осей растяжения T и сжатия P , введение в этих областях прямоугольной системы координат с осями T и P , разбиение их на множество ячеек с одинаковыми площадями (рис. 3) и определение для каждого землетрясения средней силы набора масштабно независимых параметров — компонентов вектора признаков, характеризующих зону его подготовки в течение сейсмического цикла. В число этих компо-

нентов входят интенсивность тензора среднего механизма k , коэффициент Лоде-Надаи μ , коэффициент подобия k^α и число слабых землетрясений n_l в каждой из 32 ячеек (рис. 3). Все 35 параметров нормированы — их значения заключены в интервале $[0; 1]$. Полученный набор векторов признаков используется как «образцы» для сравнения с векторами признаков тестовой выборки прошедших сильных землетрясений (ретропрогноз), после чего определяются ошибки типа «пропуск цели» и «ложный прогноз». С учётом результатов тестирования проводится сравнение вектора признаков каждого предполагаемого в будущем сильного землетрясения с каждым из «образцов». Процедура сравнения заключается в минимизации суммы квадратов разностей соответствующих компонент сравниваемых векторов. При окончательном формировании реестра прогнозируемых на будущее землетрясений вводится дополнительный критерий — максимальное приближение их графиков повторяемости к таковому для тестовой выборки. Преимущества перед аналогами: для реализации алгоритма достаточно наличия сейсмического каталога; алгоритм допускает создание самообучающейся программы с возможностью варьирования коэффициентов и показателей степеней в базовых соотношениях.

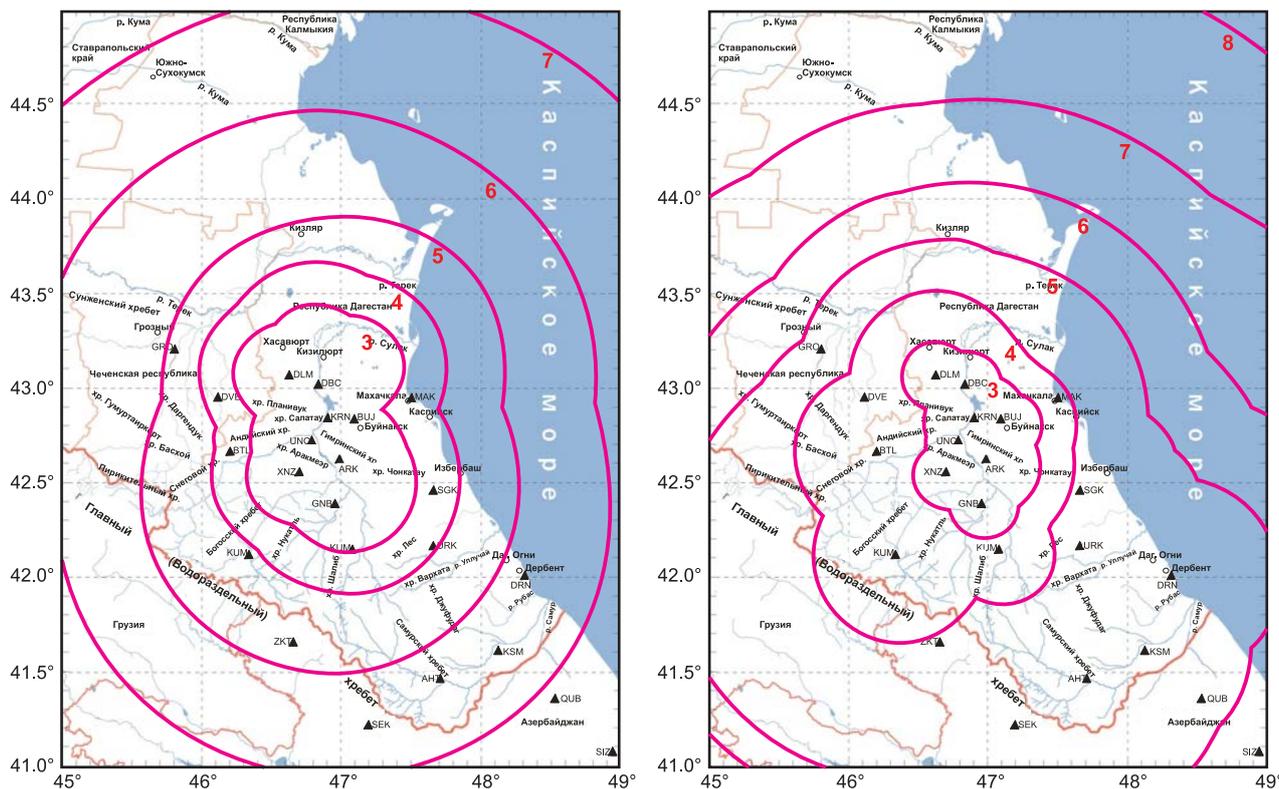


Рис. 2. Карты дальностей регистрации сейсмостанций Дагестанского филиала ПАО РусГидро (слева, число станций – 12) и ДФ ФИЦ ЕГС РАН (справа, число станций – 16)

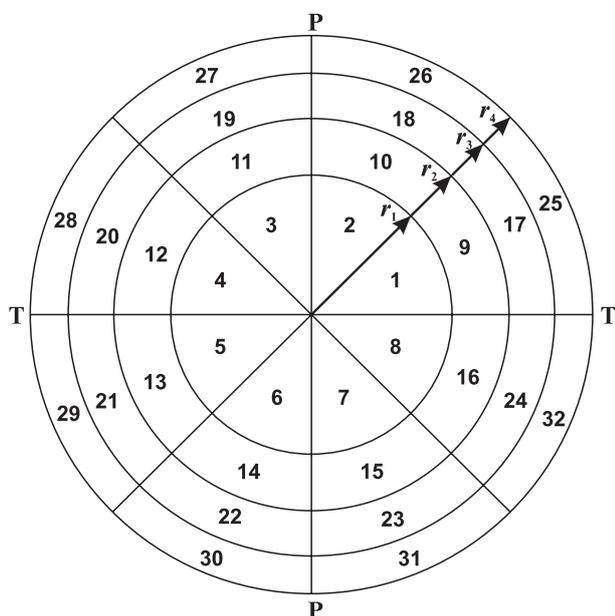


Рис. 3. Схема разбиения области подготовки землетрясений на ячейки

1.8. Разработано и зарегистрировано в Роспатенте изобретение «Сейсмоприёмник резонансный сканирующий» [Таймазов Д., Таймазов М., 2017] и его усовершенствованный вариант «Широкополосный резонансный сейсмоаку-

стический приёмник» (ШРСАП) [Таймазов Д., Таймазов М., 2018в]. В ШРСАП предусмотрена возможность детектирования сверхслабых (до 10^{-12} м по смещению) высокочастотных сейсмоакустических шумов (ВСШ) в полосе частот от 5 до 1000 Гц. В нём сканируемый частотный диапазон может быть расширен практически неограниченно путём установления в корпусе дополнительных пар сейсмоакустических приёмников с частично перекрывающимися друг друга частотными диапазонами, включая и звуковой диапазон. Так, при двух парах сейсмоакустических приёмников общий частотный диапазон, согласно расчётам, может, к примеру, составить $1 \div 1020$ Гц и состоять из четырёх поддиапазонов: $1 \div 6$; $5.5 \div 33$; $30 \div 180$; $170 \div 1020$ Гц. При этом для настройки каждого поддиапазона путём изменения жёсткости упругой пластины может быть изменена не только её толщина, но и ширина, и длина. Общая масса проволоки в этом варианте составляет $2 \cdot 180 \rho = 360 \rho$ г, что для вольфрамовой проволоки соответствует объёму в ~ 20 см³. Сравнивая эти данные с таковыми для одной пары упругих консольных пластин, констатируем увеличение в 5 раз частотного диапазона сканирования без существенного увеличения массы и габаритов.

Разработка может быть использована как в области геофизики для регистрации ВСШ и акустического каротажа скважин, так и для инженерного контроля над крупными сооружениями (зданиями, ГЭС, АЭС), а также узлами и агрегатами машин и механизмов.

Предлагаемый ШРСАП (рис. 4) содержит корпус и установленные в нём две упругие пластины консольного типа с биморфными преобразователями, на свободных концах которых укреплены инерционные массы в виде двух катушек переменной массы из прочного лёгкого материала, например, углепластика. На катушки намотана одна общая проволока из тяжёлого материала, например, вольфрама, с возможностью её перематывания между катушками. В корпусе установлены также два реверсивных мотор-генератора, каждый из которых соединён гибким приводом соответственно с первой и второй катушками. Они включены в общую электрическую цепь с возможностью согласованного попеременного переключения их из режима двигателя в режим генератора и обратно. При этом материал и геометрические размеры упругих пластин подобраны так, чтобы при перематывании проволоки между катушками их собственные частоты изменялись в смежных диапазонах частот. Это обеспечивает возможность сканирования широкой полосы частот. К другим преимуществам ШРСАП перед аналогами относятся высокая точность идентификации регистрируемых частот в широком диапазоне, компактность преобразователя и линейная зависимость выходного сигнала от амплитуд гармоник при выполнении простого соотношения $(a+b)=ac$ между указанными на рис. 4 геометрическими параметрами.

В 2020 г. разработан новый алгоритм прогнозирования землетрясений с использованием ШРСАП [Таймазов, 2020б]. Для прогнозирования места, силы и времени ожидаемого землетрясения по этому алгоритму следует осуществлять следующую последовательность действий: 1 – создание на сейсмоопасной территории наблюдательной сети и проведение режимных площадных наблюдений ВСШ приёмниками сканирующего типа (нижний рис. 4); 2 – поиск в каждом пункте наблюдения частоты f_i с наибольшей спектральной плотностью интенсивности ВСШ для первой эпохи наблюдений; 3 – построение изолиний распределения по площади параметра f_j^2 и выявление в них по алгоритму, реализованному в программе OchagZeml.exe [Таймазов, Сиражудинов и др., 2016], статистически значимых кольцевых составляющих;

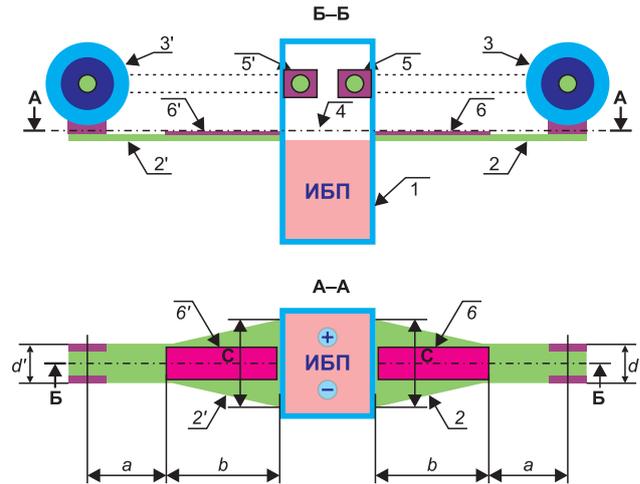


Рис. 4. Функциональная схема ШРСАП.

1 – корпус; 2,2' – упругие консольные пластины; 3,3' – катушки; 4 – вольфрамовая проволока; 5,5' – мотор-генераторы с гибкими приводами (показаны штриховыми линиями); 6,6' – биморфные пьезопреобразователи; ИБП – источник бесперебойного питания

4 – выбор нескольких (в нашем случае двух) наиболее значимых кольцевых структур и определение по ним эпицентров и глубин очагов ожидаемых землетрясений (прогноз мест землетрясений); 5 – определение текущих радиусов зон подготовки прогнозируемых землетрясений Δ_{\max} по самой удалённой от эпицентра изолинии f_j^2 и определение по известной эмпирической формуле накопленной в их ОЗ энергии; 6 – повторные площадные наблюдения ВСШ на той же территории по истечении нескольких лет и обработка результатов согласно пунктам (2)÷(5); 7 – определение по результатам наблюдений для двух эпох скоростей накопления энергии в ОЗ и их энергетических классов (прогноз силы землетрясения); 8 – определение времени, оставшегося до прогнозируемых землетрясений по эмпирическим формулам (прогноз времени землетрясений). Ожидаемые преимущества разработки связаны с высокой точностью идентификации регистрируемых частот в диапазоне $5\div 200$ Гц и практическим отсутствием метрологических требований к измерениям. Эти преимущества позволяют проводить наблюдения эпизодически, в режиме опроса закреплённых на местности пунктов одним или несколькими приборами.

Для экспериментальной проверки алгоритма совместно с Институтом геологии ДФИЦ РАН в зоне сейсмического затишья в Центральном Дагестане, где по независимым данным ожидается сильное землетрясение, проведена

рекогносцировка в 40 предполагаемых пунктах наблюдения ВСШ.

1.9. На базе изобретений по пункту 1.8, а также ещё 17 изобретений [Таймазов, 2010] в Дагестанском филиале ФИЦ ЕГС РАН совместно с Институтом геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН (ИГ ДФИЦ РАН) разработан эскизный проект Комплексной полимасштабной сейсмодеформационной станции (КПСС), структурная схема которой представлена на рис. 5.



Рис. 5. Структура комплекса и его правовая защита

Назначение КПСС: деформационный мониторинг земной коры в сеймопрогностических целях; деформационный контроль над инженерными сооружениями (ГЭС, АЭС и т.п.).

Основные ожидаемые преимущества КПСС: долговременная стабильность характеристик; наличие эффективной компенсации влияния экзогенных факторов (температуры, атмосферного давления, влажности и их градиентов); малая стоимость — в 20–50 раз дешевле известного аналога — деформационной станции штольневой типа.

Измеряемые КПСС параметры:

- локальные объёмные деформации вмещающей среды;
- локальные линейные деформации в трёх ортогональных координатах;
- величина локальных максимальных сдвиговых деформаций;
- азимут простирания и угол падения плоскости максимальных сдвиговых деформаций;
- деформация кручения относительно вертикальной оси;
- локальные наклоны по двум ортогональным азимутам;
- сейсмоакселерограммы по трём ортогональным координатам в динамическом диапазоне 100 дБ;

– огибающие амплитуд высокочастотных сейсмоакустических шумов (ВСШ) в полосе частот 1÷1000 Гц;

– спектральная плотность мощности ВСШ в полосе частот 1÷1000 Гц;

– среднемасштабные (на базе ~100÷1000 м) линейные деформации по двум ортогональным азимутам;

– среднемасштабные наклоны земной коры в двух ортогональных азимутах (гидронивелиры);

– крупномасштабные (на базе более 10 км) движения земной коры по трём ортогональным координатам (GPS/ГЛОНАСС-наблюдения с использованием глубинных реперов);

– первые и вторые производные гравитационного потенциала Земли (гравиметры, градиентометры, вариометры);

– амплитуды и фазы приливных гармоник во временных изменениях деформаций, наклонов, силы тяжести, вторых производных гравитационного потенциала и ВСШ.

2. Сейсмологические наблюдения

За пятилетний период (с 1 декабря 2015 г. по 30 ноября 2020 г.) региональной сейсмической сетью ДФ ФИЦ ЕГС РАН зарегистрировано и обработано 11387 записей землетрясений с определением всех параметров [Адилов и др., 2020; Магомедов и др., 2020]. Наблюдается динамика роста зарегистрированных и обработанных землетрясений из года в год, что объясняется несколькими причинами, основной из которых является улучшение качества цифровых записей на сейсмостанциях и качества первичной обработки землетрясений.

Наиболее заметные землетрясения в период с 1 января 2016 г. по 30 ноября 2019 г.:

– 13 мая 2016 г. в 21^h17^m с $K_p=13.4$ ($M=5.2$), произошло в Гумбетовском районе Дагестана, проявилось с наибольшей силой сотрясений 5 баллов в эпицентре. Эпицентром оказалось селение Мехельта;

– 3 мая 2017 г. в 08^h53^m с $K_p=13.1$ ($M=5.1$), зарегистрировано в южной части Чародинского района Дагестана с наибольшей силой сотрясений 5–6 баллов в эпицентре;

– 7 декабря 2017 г. в 05^h23^m с $K_p=11.6$ ($M=4.2$), отмечено на территории Южного Дагестана с интенсивностью сотрясений в эпицентре $I_0=5$ –6 баллов. Ближайшим к эпицентру населённым пунктом было селение Ляхля;

– 5 июня 2018 г. в 18^h40^m с $K_p=14.1$ ($M=5.6$), произошло в Закатальском районе Азербайджана, сопровождалось сотрясениями в эпицентре интенсивностью до 6 баллов;

– 25 мая 2019 г. в 22^h34^m с $K_p=11.5$ ($M=4.2$), произошло в районе Буйнакск с интенсивностью сотрясений 6 баллов. По инструментальным данным ДФ ФИЦ ЕГС РАН, получено следующее решение параметров гипоцентра: $\varphi=42.86^\circ\text{N}$; $\lambda=47.15^\circ\text{E}$, $h=10$ км. В результате землетрясения повреждены дома и муниципальные здания. Повреждения носили характер образования трещин на стенах и потолках, осыпания штукатурки. Школа № 4 г. Буйнакск была закрыта на ремонт;

– 10 августа 2019 г. в 07^h35^m с $K_p=12.4$ ($M=4.7$), произошло на территории Северо-Западного Азербайджана с интенсивностью сотрясений в эпицентре $I_0=5-6$ баллов.

На рис. 6 приведены карта эпицентров землетрясений (а), карта плотности эпицентров землетрясений (б) и карта активности A_{10} территории Дагестана и прилегающих районов (в) за период с 1 декабря 2015 г. по 30 ноября 2020 г., где выделяются зоны повышенной концентрации эпицентров. При построении карт плотности и активности A_{10} брались землетрясения с энергией выше представительного энергетического класса ($K_p \geq 7$). Карта разбивалась на ячейки с размерами сторон 20×20 км. Для построения карт активности использован метод суммирования с постоянной точностью. Число эпицентров землетрясений на площади осреднения круговой палетки принято равным 5. При сопоставлении карт плотности и активности наблюдается примерное совпадение районов повышенных значений плотности эпицентров и повышенных значений активности A_{10} . Районы сейсмической активности можно объединить в единое

сейсмоактивное кольцо с центром в районе сейсмостанций «Кумух», «Аракани», «Гуниб» и «Хунзах». На самом сейсмоактивном кольце выделяются районы повышенных значений плотности эпицентров и активности A_{10} : район Буйнакского и Дагестанского землетрясений, юго-восточная приграничная зона Дагестана и Чечни, приграничная зона Дагестана и Грузии, Закатальская зона, район Ляхлинского землетрясения 2017 г. и прибрежная зона в акватории Каспийского моря в районе между городами Избербаш и Дагестанские Огни.

Карта плотности эпицентров и карта активности A_{10} иллюстрируют имеющее место с 2000 г. сейсмическое затишье в Центральном Дагестане, которое в сочетании с кольцевой сейсмичностью является одним из известных признаков готовящегося сильного землетрясения. Помимо них в качестве прогностических параметров в ДФ ФИЦ ЕГС РАН рассматривается параметр τ , отражающий скоростные характеристики сейсмических волн. Аномальное поведение прогностической кривой τ большинства сейсмостанций перед землетрясением в Буйнакске 25 мая 2019 г. представлено на рис. 7.

Пониженные значения отношения скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s в районе г. Буйнакск (рис. 8) предвещали место и время приближающегося землетрясения. На рис. 8 показаны области концентрации аномально пониженных (синий цвет) и аномально повышенных (красный цвет) значений параметра V_p/V_s . Область пониженных значений располагается в районе Буйнакск, охватывая территорию северо-запада Дагестана и района сильных

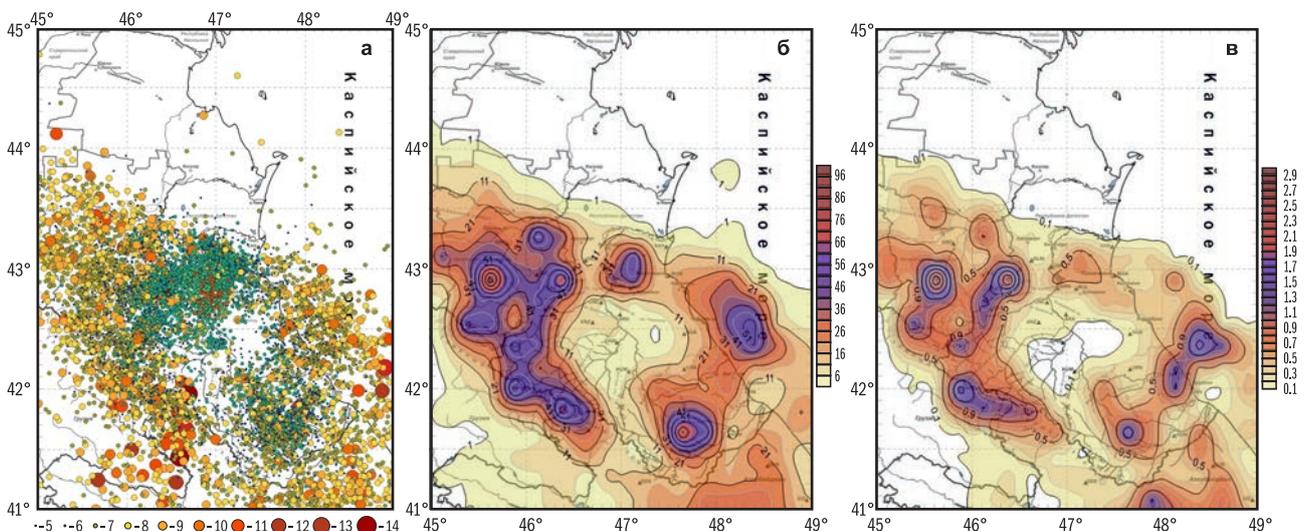


Рис. 6. Карты эпицентров (а), плотности эпицентров землетрясений (б), и карта активности A_{10} (в) на территории Дагестана и прилегающих районов за период с 1 декабря 2015 г. по 30 ноября 2020 г.

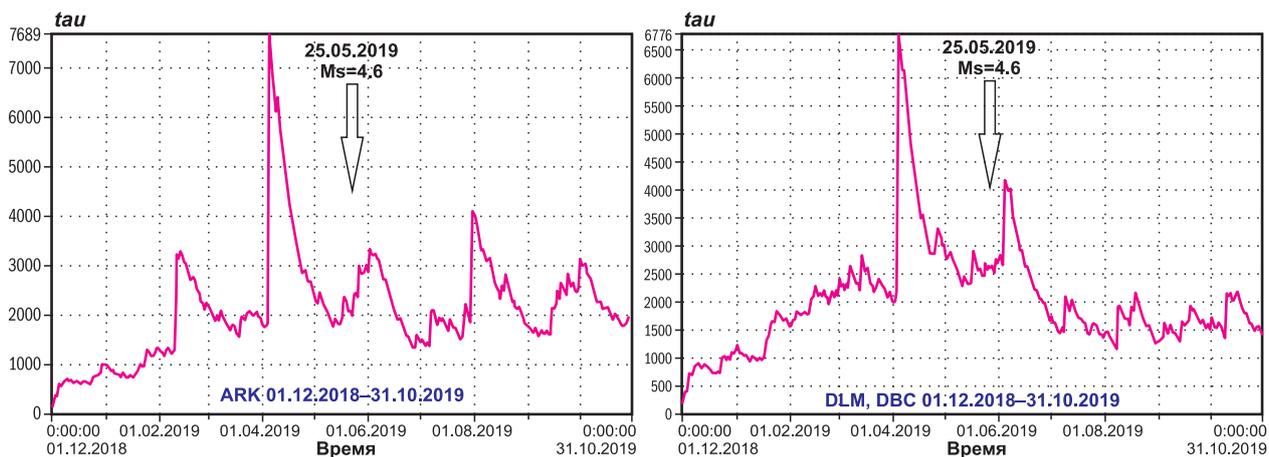


Рис. 7. Прогностические кривые τ по данным сейсмостанций «Аракани», «Дылым» и «Дубки»

землетрясений 1970 и 1976 года. А поле повышенных значений располагается в районе Дербента и Касумкента, охватывает большую территорию до границ с Азербайджаном и прибрежную зону Каспия. Также поле повышенных значений располагается в районе Сергокала. Мы ассоциируем пониженные значения с областью, испытывающей напряжения растяжения. Область повышенных значений — с напряжением сжатия.

3. Геохимические и геофизические наблюдения

3.1. Корреляционный анализ геохимических и сейсмических временных рядов

Проведённое ранее визуальное сопоставление временного ряда концентраций водорода в приземной атмосфере на наблюдательном пункте «Дубки» в Дагестане с сейсмическим режимом региона показало [Саидов, Даниялов, 2007; Саидов и др., 2007; Саидов, 2020], что скачкообразные изменения дисперсии концентрации водорода, как правило, соответствуют сейсмическим событиям, в ряде случаев являясь их предвестниками. Выполненный в 2020 г. более строгий статистический анализ этих наблюдений [Саидов и др., 2020], вместе с наблюдениями гелия в попутном газе самоизливающейся водяной скважины на станции «Караман», основан на следующем алгоритме: 1 – в графике изменения исследуемого параметра выделяются интервалы следующих типов: убывания, минимума, возрастания и максимума; 2 – для каждого типа интервала t подсчитывается частота h_t попаданий землетрясений, имеющих энергетический класс не ниже K (K меняется от 9 до 12), в соответствующие интервалы. Затем эта частота сравнивается с величиной $\tau_{\text{avg}} = l_t/l$, где l_t – суммарная длительность всех интервалов типа t , а l – длительность всего рассматриваемого периода. Далее анализируется величина h_t/τ_{avg} . Если она больше 1, то это значит, что события преимущественно попадают в интервалы данного типа. Результаты обработки приведены на рис. 9.

Анализ результатов приводит нас к следующим выводам:

– относительно преобладающее число событий выше 9 энергетического класса в регионе попадает на временные интервалы возрастания дисперсии концентрации водорода и на интервалы

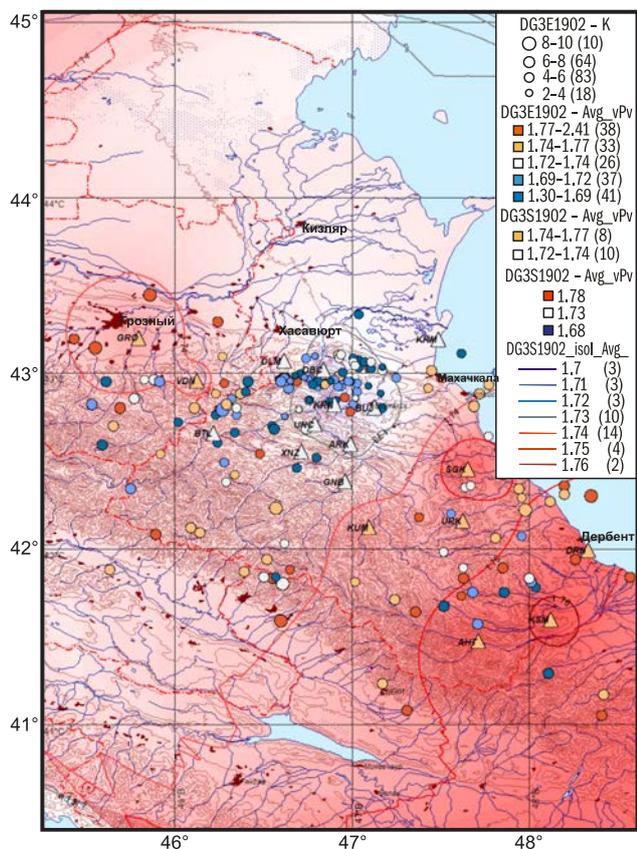


Рис. 8. Карта пространственного изменения отношения скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s перед Буйнакским землетрясением 25 мая 2019 г.

минимума самой концентрации, при этом временные ряды дисперсий теснее коррелируют с региональной сейсмичностью, чем ряды самих концентраций, но чем выше классы рассматриваемых событий, тем менее существенной становится разница;

– относительно преобладающее число событий выше 9 класса попадает на интервалы максимума дисперсии концентрации гелия и на интервалы возрастания самой концентрации, причём в обоих случаях степень корреляции примерно одинакова и тем заметней, чем выше класс землетрясений;

– сопоставительный анализ сейсмических и геохимических временных рядов, выполненный с учётом только тех землетрясений, в зоны подготовки которых попадают пункты наблюдения, не приводит к однозначным выводам ввиду недостаточной статистики (количество событий не превышает 11 для пункта «Дубки» и шести – для пункта «Караман»).

Для эффективного использования результатов в сейсмопрогнозе следует расширить охватываемую наблюдениями площадь путём отбора и анализа проб в стационарных условиях.

3.2. Температурные наблюдения в скважине

В 2016–2020 гг. были продолжены температурные наблюдения в скважине в районе пло-

тины Чиркейской ГЭС в Дагестане прецизионным терморезистором, установленным на глубине 130 м.

На рис. 10 слева показан временной ход температуры в период с 2009 по 2020 год. Визуально на графике видны колебания температуры с годовым периодом и амплитудой порядка 0.02°C на фоне линейного тренда, составляющего $+0.26^\circ\text{C}$ за последние 10 лет, что в пределах разброса встречающихся в литературе оценок совпадает с темпом глобального потепления, а годовые колебания естественным образом объясняются сезонными изменениями температуры. На рис. 10 справа приведён фрагмент спектра временных изменений температуры в 2018 г., на котором отчётливо выделяются 24-часовая гармоника и её обертоны – 12, 8, 6 и 4-часовые гармоники с амплитудами от $2 \cdot 10^{-5}$ до $7 \cdot 10^{-5}^\circ\text{C}$.

Наличие 24-часовой гармоники в температурных наблюдениях как на поверхности, так и в приповерхностном слое Земли вполне ожидаемо и обусловлено суточными колебаниями солнечной радиации. Но при этом остаётся неясным, почему эта гармоника и её обертоны не затухают в результате интерференции волн, идущих под разными углами от разных участков дневной поверхности. Для выяснения этого вопроса предполагается установить термодатчики в скважине

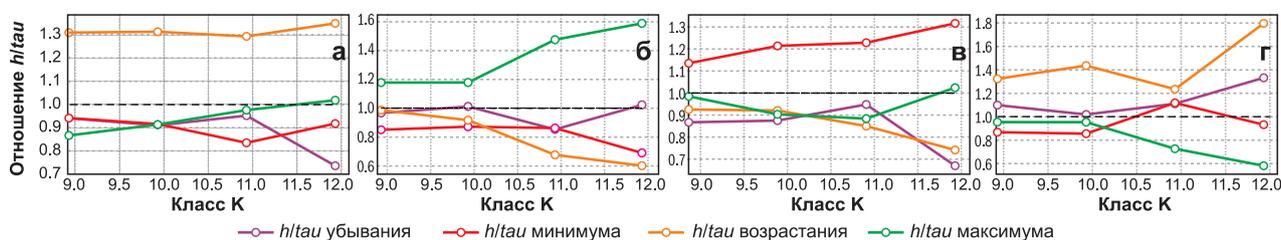


Рис. 9. Нормализованная относительно τ статистика попадания землетрясений на территории Дагестана на разные типы интервалов дисперсии концентрации и самой концентрации водорода на геохимическом пункте «Дубки» (а, в) и гелия на геохимическом пункте «Караман» (б, г)

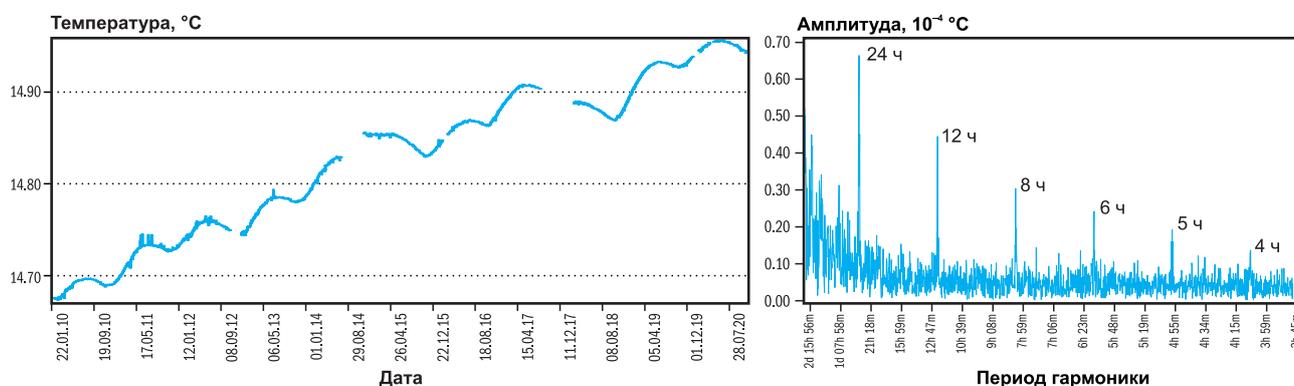


Рис. 10. Слева – временной ход температуры воды в скважине станции «Чиркей» за период 18.12.2009 г. – 03.11.2020 г. (глубина – 130 м); справа – временной спектр температуры в скважине вблизи Чиркейского гидроузла за 14.02.2018 – 07.11.2018 г.

на разных глубинах и провести сравнительный анализ результатов обработки полученных данных.

На рис. 11 показан временной ход амплитуд четырёх наиболее значимых из выделенных гармоник — S_1 (24 ч), S_2 (12 ч), S_3 (8 ч), S_4 (6 ч), полученный с помощью оконного преобразования Фурье с шириной окна в три месяца и шагом в одни сутки. На нём наблюдается аperiodическая синхронность, практически не связанная с сезонными изменениями температуры воздуха (рис. 10). Причины появления в температурных временных рядах таких чётких и устойчивых гармоник и их синхронных изменений во времени остаются неясными. Возможно, они отражают изменения напряжённо-деформированного состояния прилегающего массива горных пород, вследствие чего изменяется их температуропроводность.

Дополнительный интерес представляет проведённое нами сопоставление аномалий на графике временного хода амплитуд гармоник (рис. 11) с глобальными сейсмическими событиями. Для этого были выбраны только те из них, в которых амплитуды основной 24-часовой гармоники и её обертонов растут синхронно (синхронные максимумы). Поскольку таких максимумов довольно много, то для предварительного визуального анализа из них отобраны те, в которых амплитуда основной гармоники равна

или выше $1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$, что соответствует 10σ (синяя штриховая линия). Таких синхронных максимумов — пять, их пики на рис. 11 пронумерованы в хронологическом порядке. Красными вертикальными штриховыми линиями показаны даты наиболее близких к ним по времени сейсмических событий в мире с магнитудами выше 7.5. Из рисунка видно, что четыре из пяти пиков синхронных максимумов совпадают по времени с наиболее сильными землетрясениями в годовом интервале около этих пиков. Особо следует отметить почти точное совпадение первого и второго пиков соответственно с Чилийским землетрясением 27 февраля 2010 г. ($M=8.8$) и с Великим восточно-японским землетрясением 11 марта 2011 г. ($M=9$). При этом второй пик почти в 3 раза превосходит по амплитуде остальные пики, а продолжительность самого максимума составляет около пяти месяцев. Менее точны совпадения третьего и пятого пиков с сейсмическими событиями — соответственно с землетрясениями 20 апреля 2016 г. ($M=7.8$, Эквадор) и 23 января 2018 г. ($M=7.9$, залив Аляска), а у четвёртого пика и вовсе не выявлено явной связи с каким-либо значимым событием. Конкретный механизм такой взаимосвязи не выяснен, но связь с солнечной активностью не просматривается — первые два события произошли вблизи минимума солнечной активности, остальные два — ближе к фазе максимума.

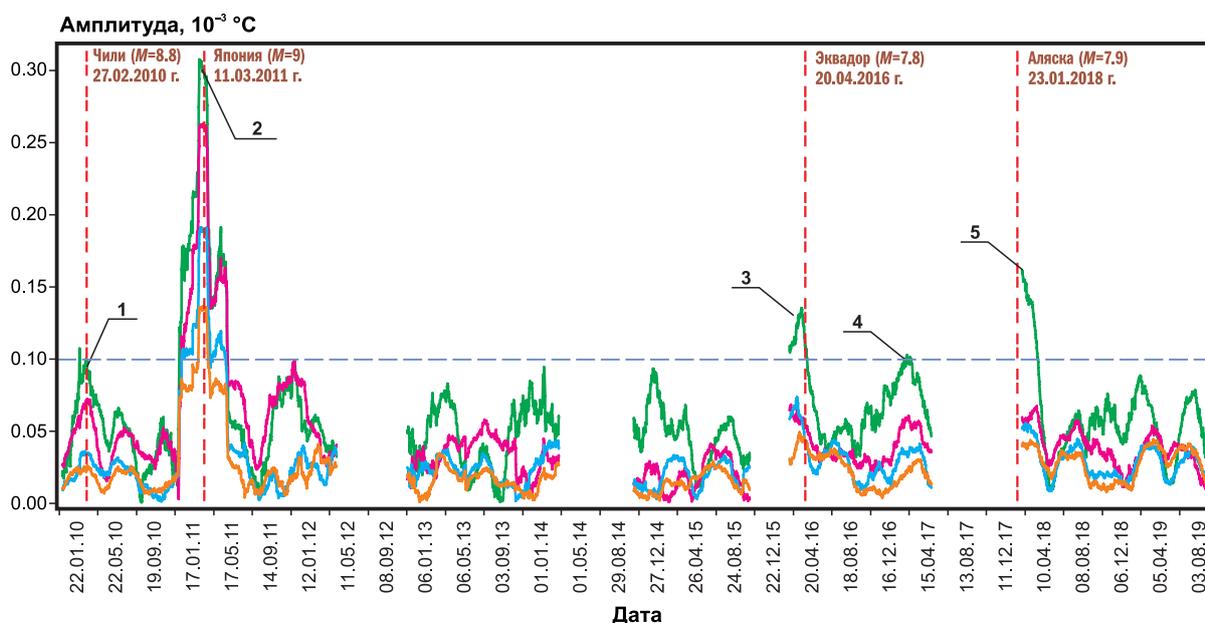


Рис. 11. Временной ход амплитуд гармоник.

Зелёным цветом показана 24-часовая гармоника, красным — 12-часовая, бирюзовым — 8-часовая, оранжевым — 6-часовая. Красные вертикальные штриховые линии — сильные землетрясения, горизонтальная штриховая линия соответствует $1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$. Цифрами 1–5 обозначены синхронные максимумы

При интерпретации отмеченных совпадений следует иметь в виду географическую удалённость очагов землетрясений от нашего пункта наблюдений (10–15 тыс. км). Это означает, что о существовании причинно-следственных связей между нашими аномалиями и рассматриваемыми сейсмическими событиями вряд ли может идти речь. Скорее всего, оба сравниваемых явления вызваны общим внешним фактором и, если совпадения не случайны, этот фактор однозначно связан с Солнцем.

Вместе с тем в данных 2017 и 2018 г. также выявлены синхронные максимумы меньших амплитуд (например, февраль–март 2017 г. и июнь–сентябрь 2018 г.). На рис. 11 видны и несколько синхронных минимумов (они нами не выделены). Каких-либо ощутимых сейсмических событий или техногенных воздействий, явно связанных с этими максимумами и минимумами, пока не обнаружено. Для ответа на возникшие вопросы следует проводить детальные температурные наблюдения на разных глубинах в нескольких удалённых друг от друга скважинах.

3.3. Периодические составляющие в вариациях слабой сейсмичности

Для выявления периодов в вариациях сейсмичности производится построение графика временного хода условной накопленной сейсмической энергии (УНСЭ) по алгоритму, предложенному в работах [Таймазов Д., Таймазов М., 2018б; Таймазов, Шарпудинов и др., 2018].

Для апробации этого алгоритма использована база данных сейсмологических наблюдений на 16 станциях региональной сети Дагестанского филиала ФИЦ ЕГС РАН по территории Восточного Кавказа и данные Гарвардского каталога землетрясений по территориям штата Калифорния (США) и Новой Зеландии. Результаты показаны на рис. 12–14 и в табл. 1.

Из анализа спектров и таблицы можно сделать следующие выводы.

1. Сравнение спектров Фурье условно накопленной сейсмической энергии (УНСЭ) и частоты землетрясений (ЧЗ) на рис. 13, а также амплитуд суточных гармоник A_k (*sigma*) в табл. 1 наглядно показывают преимущества алгоритма УНСЭ по сравнению с традиционным анализом по частоте землетрясений.

2. Доминирование в спектрах суточной гармоники S_1 , с одной стороны, и показанное нами ранее доминирование полусуточной гармоники S_2 в вариациях атмосферного давления (см. пункт 1.1), с другой, позволяют однозначно исключить колебания атмосферного давления из

возможных причин суточных вариаций сейсмичности.

3. Сравнение спектра температуры (рис. 10) и спектра УНСЭ по Новой Зеландии (рис. 14) приводит к выводу, что внутрисуточные вариации температуры в скважине и слабой сейсмичности вызваны общим внешним фактором, однозначно связанным с Солнцем.

4. В результате гармонического анализа с использованием алгоритма УНСЭ сейсмических наблюдений в штате Калифорния (США) в диапазоне классов 5.5–6 (рис. 13), впервые на уровне достоверности, соответствующей ~5 стандартным отклонениям, показано существование модуляции слабой сейсмичности полусуточной приливной волной M_2 (период 12 ч 24 мин).

Обобщая, можно констатировать, что полученные результаты показывают перспективы углублённого анализа отклика сейсмического процесса на природные и антропогенные ритмические воздействия и, на наш взгляд, будут способствовать как установлению причин периодических колебаний в слабой сейсмичности, так и более полному раскрытию природы самой сейсмичности и, возможно, выявлению новых предвестников землетрясений.

4. Прикладные исследования

В Дагестанском филиале ФИЦ ЕГС РАН совместно с Сейсмологическим филиалом (СЕФ) ФИЦ ЕГС РАН впервые в натурном эксперименте определены собственные частоты и построены детальные формы колебаний плотины Чиркейской ГЭС.

Проведённые исследования можно условно разделить на два этапа: первый – выполнение измерений микросейсмических колебаний объекта по детальной сетке с использованием опорных точек; второй – выполнение цифровой обработки полученных данных с целью получения единовременных колебаний стоячих волн и определения по ним собственных частот и форм колебаний.

Измерения проведены при максимуме (ноябрь 2017 г.) и при минимуме (апрель 2018 г.) уровня верхнего бьефа (УВБ) плотины [Лисейкин и др., 2019; Liseikin et al., 2020]. В табл. 2 и 3 На рис. 15 представлены схематические изображения 1-й, 2-й и 4-й форм собственных радиальных колебаний плотины Чиркейской ГЭС на вышеприведённые даты и УВБ. Из рисунков видно, что 4-я и особенно 2-я формы имеют «классический» вид чередующихся вдоль плотины узлов и пучностей, практически симметрично распределённых, амплитуды

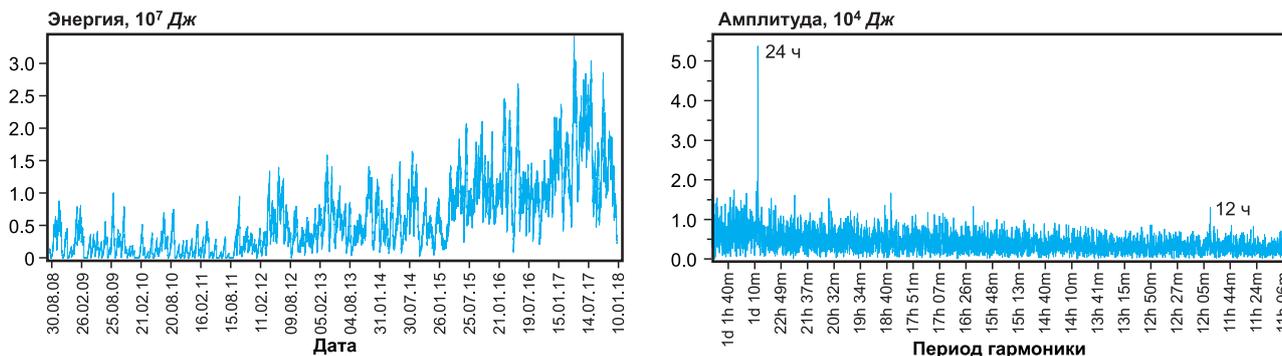


Рис. 12. График УНСЭ, построенный по каталогу Восточного Кавказа для событий 6 класса ($5.5 \leq K \leq 6.5$, число событий – 1824) за период 01.01.2008 г. – 31.12.2017 г. (слева) и его временной спектр (справа)

Таблица 1. Амплитуды в сигмах и акрофазы в часах и минутах суточных гармоник временных рядов ЧЗ и УНСЭ в период 01.01.2014 г. – 31.12.2018 г. для ВК, R100 и R50

Классы Зона	4			5			6		
	ВК	R100	R50	ВК	R100	R50	ВК	R100	R50
ЧЗ	3.25	3	4.39	7	5.9	3.4	7.5	1.45	0.9
A_k (Акрофаза)	(21:00)	(21:12)	(19:30)	(16:30)	(17:00)	(17:06)	(17:00)	(16:48)	(23:00)
УНСЭ	7.97	7.67	9.44	8.35	7.5	5.64	10.63	4.34	1.71
A_k (Акрофаза)	(12:00)	(12:00)	(17:00)	(12:00)	(12:50)	(12:30)	(16:00)	(22:00)	(20:00)
Число событий	509	503	476	1236	1108	936	1910	1189	659

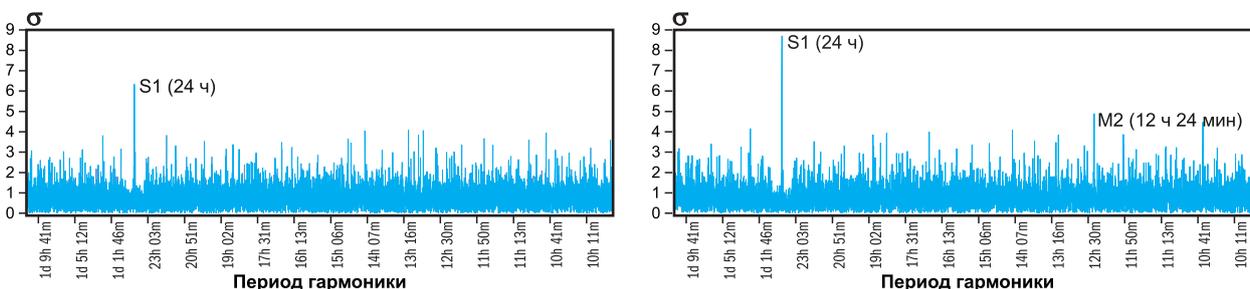


Рис. 13. Сигма-график спектра ЧЗ (слева) и УНСЭ (справа) классов 5.5–6 за 1991–2000 гг. ($\varphi=34-38^\circ N$, $\lambda=121-117^\circ W$, штат Калифорния, США)

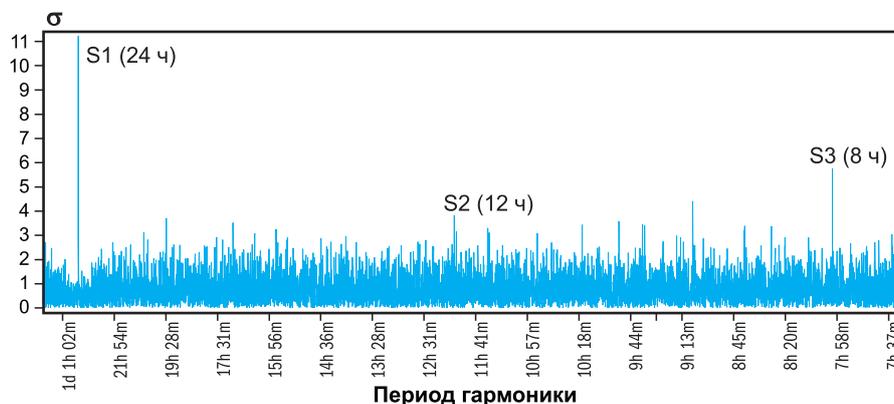


Рис. 14. Сигма-график для спектра УНСЭ по Новой Зеландии ($\varphi=48-34^\circ S$, $\lambda=165-179^\circ E$), классы 6.5–7.5, 2009–2016 гг. (33061 событие)

Таблица 2. Значения собственных частот плотины Чиркейской ГЭС на дату 01.11.2017 г. при УВБ=347 м

№	Частота, Гц	Примечания
1	2.15*	1-я форма
2	2.30*	2-я форма
3	2.78	Сложная форма
4	3.32	Возможно, 3-я форма, приближена к оборотной частоте
5	3.76	Сложная форма
6	4.88*	4-я форма
7	6.64	Сложная форма, приближена к двойной оборотной частоте
8	6.93	Сложная форма
9	9.28	Сложная форма
10	11.5	Сложная форма
11	14.5	Сложная форма. Возможно, это 9-я форма
12	16.0	Сложная форма

Таблица 3. Значения собственных частот плотины Чиркейской ГЭС на дату 12.04.2018 г. при УВБ=318 м

№	Частота, Гц	Примечания
1	2.39*	1-я форма
2	2.59*	2-я форма
3	2.98	Сложная форма
4	3.32	Возможно, 3-я форма, приближена к оборотной частоте
5	4.59	Сложная форма
6	5.32*	4-я форма
7	6.64	Сложная форма, приближена к двойной оборотной частоте
8	7.13	Сложная форма, возможно 5-я форма
9	8.15	Сложная форма, возможно 6-я форма
10	10.3	Сложная форма, возможно 7-я форма

Примечание – * – наиболее высокоамплитудные, ярко выраженные собственные формы. приведены значения выделенных частот собственных колебаний арочной плотины Чиркейской ГЭС на дату 01.11.2017 г. при УВБ=347 м и на дату 12.04.2018 г. при УВБ=318 м соответственно.

колебаний максимальны на гребне и понижаются к низу плотины.

Заключение

В ДФ ФИЦ ЕГС РАН выполнен комплекс теоретических и методических исследований, сейсмологических, геофизических и геохимических наблюдений на региональном и локальном уровнях, а также обработка данных с использованием новых программно-методических разработок, которые привели к ряду научных результатов приоритетного характера.

Разработана программа для ЭВМ «Построение передаточной функции между временными рядами по относительным амплитудам когерентных гармоник» (свидетельство № 2016661714). Совместная обработка с её помощью барометрических и гидрогеодинамических наблюдений

на трёх скважинах в Дагестане показала, в частности, что в вариациях атмосферного давления и в отклике на них уровней воды в скважинах доминирующей гармоникой является полусуточная волна S_2 .

В результате гармонического анализа временных рядов непрерывных температурных наблюдений в скважине на глубине 130 м около Чиркейского гидроузла в Дагестане отчётливо выделены устойчивые внутрисуточные гармоники. На графиках временного хода амплитуд этих гармоник за период 2010–2018 гг. выявлено пять синхронных пиков высотой более 10σ , четыре из которых совпадают по времени с наиболее сильными землетрясениями мира. Разработано изобретение «Способ реконструкции динамических процессов в земной коре по сейсмическим наблюдениям» (патент РФ № 2659452), которое реализовано в компьютерной программе

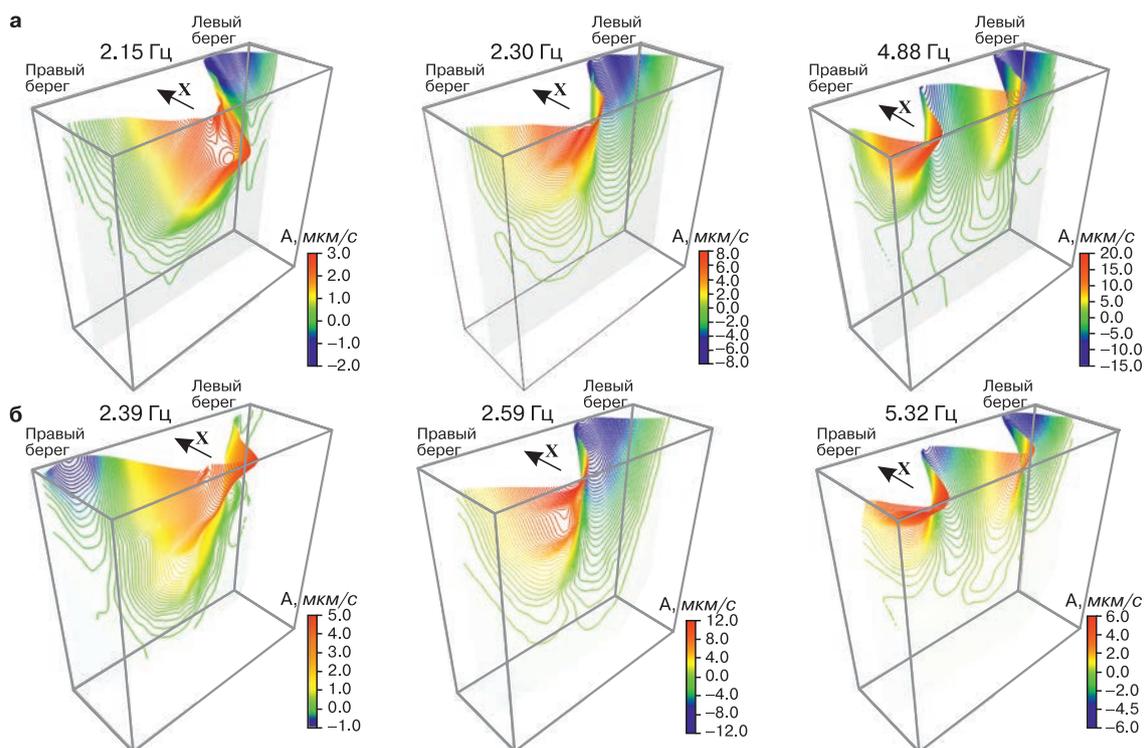


Рис. 15. Схематические изображения 1-й, 2-й и 4-й форм собственных радиальных колебаний плотины Чиркейской ГЭС на дату 01.11.2017 г. при УВБ=347 м (а) и на дату 12.04.2018 г. при УВБ=318 м (б)

«Реконструкция геодинамических процессов по сейсмическим наблюдениям» (свидетельство № 2018616052). В результате обработки по этой программе сейсмических наблюдений в штате Калифорния (США) в диапазоне энергетических классов 5–6 впервые на уровне достоверности, соответствующей ~5 стандартным отклонениям, установлено существование модуляции слабой сейсмичности лунной полусуточной приливной волной M_2 (период 12 ч 24 мин), а обработка слабой сейсмичности на территории Новой Зеландии выявила доминирующую суточную гармонику S_1 и её обертоны S_2 , S_3 и S_4 . Сопоставление этого результата с отмеченным выше доминированием полусуточной гармоники в вариациях атмосферного давления однозначно исключает последнее из возможных причин суточных вариаций сейсмичности.

Разработано и зарегистрировано в Роспатенте изобретение «Способ прогнозирования тектонических землетрясений» (патент РФ № 2660771), в котором предусмотрено последовательное определение места, силы и времени сильных тектонических землетрясений. Для его реализации разработана и зарегистрирована в Роспатенте компьютерная программа «Определитель параметров деформационных аномалий в земной коре по площадным наблюдениям геополей» (свидетельство № 2016663005).

Разработаны и зарегистрированы в Роспатенте изобретения «Сейсмоприёмник резонансный сканирующий» (патент РФ № 2635399) и «Широкополосный резонансный сейсмоакустический приёмник» (патент РФ № 2660768). На их базе разработан «Способ прогнозирования землетрясений по площадным наблюдениям высокочастотных сейсмических шумов» (2020 г.), а также совместный с Институтом геологии Дагестанского ФИЦ РАН инновационный проект «Комплексная полимасштабная сейсмодеформационная станция» (КПСС). Разработка может быть использована для деформационного мониторинга земной коры в сеймопрогностических целях и для деформационного контроля над крупными инженерными сооружениями (ГЭС, АЭС и т.п.). В 2020 г. разработан и подготовлен для представления в Роспатент «Способ прогнозирования землетрясений по сейсмическим наблюдениям», который основан на масштабной инвариантности сейсмического процесса и на известных эмпирических соотношениях между энергетическими и пространственно-временными параметрами землетрясений. Алгоритм позволяет создать для его реализации самообучающиеся программы. Для этого достаточно иметь каталог многолетних сейсмических наблюдений на контролируемой территории.

Разработана, зарегистрирована в Роспатенте (свидетельство № 2020662943) и введена в эксплуатацию программа «Построитель карт регистрационных возможностей сетей сейсмостанций». Она предназначена для автоматической генерации карт регистрационных возможностей сетей сейсмических станций по заданным параметрам сейсмостанций и может применяться в деятельности организаций, осуществляющих мониторинг сейсмического режима.

На территории Дагестана совместно с сотрудниками ИФЗ РАН апробирована новая методика изучения распределения потенциала энергии деформации сдвига в земной коре, а совместно с СЕФ ФИЦ ЕГС РАН впервые в натурном эксперименте определены собственные частоты и построены детальные формы колебаний плотины Чиркейской ГЭС. Результаты могут быть использованы для мониторинга технического состояния плотины.

Сравнение приведённых выше результатов анализа сейсмологических данных по территориям Восточного Кавказа и других регионов мира (Калифорния, Новая Зеландия), где плотность сети выше более чем на порядок, показывает на необходимость существенного увеличения густоты сети станций, контролирующих наш регион.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

Адилов З.А., Асекова З.О., Гамидова А.М., Мусалаева З.А., Павличенко И.Н., Сагателова Е.Ю., Шахмарданова С.Г. Каталог (оригинал) землетрясений Дагестана за 2016–2020 гг. — Махачкала: Фонды ДФ ФИЦ ЕГС РАН, 2020.

Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адилов З.А. Сезонные изменения параметров собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС по данным метода стоячих волн // Гидротехническое строительство. — 2019. — № 10. — С. 28–33.

Магомед-Касумов М.Г., Адилов З.А., Султанамедов М.С., Шарпудинов Т.И. Построитель карт регистрационных возможностей сетей сейсмостанций / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664390 от 12.11.2020 г. — М.: Роспатент, 2020.

Магомедов Х.Д., Адилов З.А., Асекова З.А., Гамидова А.М., Мусалаева З.А., Сагателова Е.Ю., Павличенко И.Н., Шахмарданова С.Г. Каталог землетрясений Северо-Восточного Кавказа (территория Дагестана и приграничные зоны) и акватории Среднего Каспия за I квартал 2020 г. // Мониторинг. Наука и технологии. — 2020. — № 2 (44). — С. 101–113. doi: 10.25714/MNT.2020.44.014

Панахов В.С., Адилов З.А. SEISMO / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610834 от 18.01.2019 г. — М.: Роспатент, 2019.

Саидов О.А. Вариации концентрации водорода в приземной атмосфере в связи с проявлением сейсмичности на Восточном Кавказе // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — Т. 2, № 2. — С. 76–83. doi: 10.35540/2686-7907.2020.2.07

Саидов О.А., Даниялов М.Г. Вариации водорода при крупных землетрясениях Кавказа и сопредельных территорий // Сейсмический мониторинг и изучение геодинамики территории Дагестана и акватории Среднего Каспия. Сборник трудов № 1 ДФ ГС РАН / Отв. ред. Р.А. Левкович, А.Ш. Исмаилов. — Махачкала: «Эпоха», 2007. — С. 129–135.

Саидов О.А., Сулейманов А.И., Касумов Г.А., Воронцова Т.М. Результаты режимных наблюдений за параметрами подземных водно-газовых систем сейсмоактивной области «Дагестанский клин» // Сейсмический мониторинг и изучение геодинамики территории Дагестана и акватории Среднего Каспия. Сборник трудов № 1 ДФ ГС РАН / Отв. ред. Р.А. Левкович, А.Ш. Исмаилов. — Махачкала: «Эпоха», 2007. — С. 140–148.

Саидов О.А., Таймазов Д.Г., Магомедов С.Р., Магомед-Касумов М.Г., Шарпудинов Т.И., Султанамедов М.С. Сопоставительный анализ геохимических временных рядов и сейсмического режима территории Дагестана // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. — 2020. — № 2 (81). — С. 57–69. doi: 10.33580/2541-9684-2020-81-2-57-69

Таймазов Д.Г. Масштабная инвариантность параметров землетрясений и возможный алгоритм их прогноза // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. — 2021. — № 1 (84). (В печати).

Таймазов Д.Г. О возможности прогноза землетрясений по площадным наблюдениям высокочастотных сейсмических шумов // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. — 2020б. — № 4 (83). — С. 75–81. doi: 10.33580/2541-9684-2020-83-4-75-81

Таймазов Д.Г. О возможности создания многокомпонентной деформационной станции траншейного типа для сеймопрогностических наблюдений // Сейсмические приборы. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 42–49.

Таймазов Д.Г., Сиражудинов М.М., Кадиев Р.И. Определитель параметров деформационных аномалий в земной коре по площадным наблюдениям геополей / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663005 от 28.11.2016 г. – М.: Роспатент, 2016.

Таймазов Д.Г., Таймазов М.Д. Сейсмоприёмник резонансный сканирующий / Патент на изобретение RU 2635399 от 13.11.2017 г. – М.: Роспатент, 2017.

Таймазов Д.Г., Таймазов М.Д. Способ прогнозирования тектонических землетрясений / Патент на изобретение RU 2660771 от 09.07.2018 г. – М.: Роспатент, 2018а.

Таймазов Д.Г., Таймазов М.Д. Способ реконструкции динамических процессов в земной коре по сейсмическим наблюдениям / Патент на изобретение RU 2659452 от 02.07.2018 г. – М.: Роспатент, 2018б.

Таймазов Д.Г., Таймазов М.Д. Широкополосный резонансный сейсмоакустический приёмник /

Патент на изобретение RU 2660768 от 09.07.2018 г. – М.: Роспатент, 2018в.

Таймазов Д.Г., Шаранудинов Т.И., Магомед-Касумов М.Г., Султанахмедов М.С. Построение передаточной функции между временными рядами по относительным амплитудам когерентных гармоник / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661714 от 19.08.2016 г. – М.: Роспатент, 2016.

Таймазов Д.Г., Шаранудинов Т.И., Магомед-Касумов М.Г., Султанахмедов М.С. Реконструкция геодинамических процессов по сейсмическим наблюдениям / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616052 от 22.05.2018 г. – М.: Роспатент, 2018.

Liseikin A.V., Seleznev V.S., Adilov Z.A. Monitoring of the natural frequencies of Chirkey arch dam // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – V. 96 (4). – P. 15–26. doi: 10.18720/MCE.96.2

Сведения об авторах

Магомедов Хаскил Джарулаевич, директор Дагестанского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ДФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Махачкала, Россия. E-mail: haskil@dbgsras.ru

Таймазов Джамалудин Гаджиевич, канд. физ.-мат. наук, уч. секр. ДФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Махачкала, Россия; ст. науч. сотр. Института геологии – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ ДФИЦ РАН), г. Махачкала, Россия. E-mail: dtaim@dbgsras.ru

Адилов Зарахман Ашуралиевич, зам. зав. отделом ДФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Махачкала, Россия. E-mail: adilov79@mail.ru

Магомед-Касумов Магомедрасул Грозбекович, канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе ДФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Махачкала, Россия; ст. науч. сотр. ДФИЦ РАН, г. Махачкала, Россия. E-mail: rasuldev@gmail.com

Results of complex seismological, geophysical and geochemical researches on the territory of the Republic of Dagestan in 2016–2020

© 2021 Kh.D. Magomedov¹, D.G. Taimazov^{1,2}, Z.A. Adilov¹, M.G. Magomed-Kasumov^{1,3}

¹DD GS RAS, Makhachkala, Russia; ²IG DFRC RAS, Makhachkala, Russia;

³DFRC RAS, Makhachkala, Russia

Received February 19, 2021

Abstract The work describes the research and development carried out at the DD GS RAS over the past 5 years, mainly of an innovative nature. These developments include the computer program “Construction the transfer function between time series based on the relative amplitudes of coherent harmonics”, invention “Method for reconstructing dynamic processes in the earth’s crust based on seismic observations implemented in computer program “Reconstruction of geodynamic processes based on seismic observations”, SEISMO program, invention “Method for predicting tectonic earthquakes” implemented in the computer program “Detector of deformation anomalies parameters in the earth’s crust based on areal observations of geofields”, computer program “Maps builder of seismic station networks registration capabilities”. Their application provided scientific results of a priority nature, the main of which are the identification of a significant correlation between time series of concentrations and dispersions of hydrogen and helium and the seismic regime of the region, establishment of dominance in atmospheric pressure variations and in the response to them of water levels in wells of semidiurnal harmonic, while in intraday fluctuations of weak seismicity, the 24-hour harmonic dominates, which unambiguously excludes atmospheric pressure from the possible causes of daily variations, correlation of synchronous peaks in the time variation of the intraday harmonics amplitudes in temperature observations in a well with the world’s strongest earthquakes, establishment a fact of weak seismicity modulation by a semidiurnal tidal wave M_2 , detection in variations of weak seismicity along with the daily harmonic S_1 (24h) of stable intraday harmonics S_2 (12h), S_3 (8h) and S_4 (6h). A number of priority results obtained in collaboration with employees of the Siberian Division GS RAS and the Institute of Physics of the Earth RAS are also described.

Keywords Seismic observations, forecast, deformation anomalies, registration capabilities, dispersion, harmonics, modulation.

For citation Magomedov, Kh.D., Taimazov, D.G., Adilov, Z.A., & Magomed-Kasumov, M.G. (2021). [Results of complex seismological, geophysical and geochemical researches on the territory of the Republic of Dagestan in 2016-2020]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(2), 67-85. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.04>

References

- Adilov, Z.A., Asekova, Z.O., Gamidova, A.M., Musalaeva, Z.A., Pavlichenko, I.N., Sagatlova, N.Yu., & Shakhmardanova, S.G. (2020). [Catalog (original) of the earthquakes of Dagestan for 2016-2020]. Makhachkala, Russia: Funds DD GS RAS. (In Russ.).
- Liseikin, A.V., Seleznev, V.S., & Adilov, Z.A. (2019). Determining the natural frequencies and modes of vibration of the Chirkey arch dam by the standing-wave method. *Power Technology and Engineering*, 53(1), 39-43. doi: 10.1007/s10749-019-01031-x
- Liseikin, A.V., Seleznev, V.S., & Adilov, Z.A. (2020). Monitoring of the natural frequencies of Chirkey arch dam. *Magazine of Civil Engineering*, 96(4), 15-26. doi: 10.18720/MCE.96.2
- Magomed-Kasumov, M.G., Adilov, Z.A., Sultankhmedov, M.S., & Sharapudinov, T.I. (2020). [Maps builder of seismic station networks registration capabilities]. Patent RF, no. 2020664390. (In Russ.).
- Magomedov, Kh.D., Adilov, Z.A., Asekova, Z.O., Gamidova, A.M., Musalaeva, Z.A., Pavlichenko, I.N., Sagatlova, N.Yu., & Shakhmardanova, S.G. (2020). [Catalog of earthquakes of the North-Eastern Caucasus (territory of Dagestan and border zone) and the Middle Caspian for the first quarter of 2020]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii* [Monitoring. Science and Technology], 2(44), 101-113. (In Russ.). doi: 10.25714/MNT.2020.44.014
- Panakhov, V.S., & Adilov, Z.A. (2019). SEISMO. Patent RF, no. 2019610834. (In Russ.).

- Saidov, O.A. (2020). [Variations of hydrogen in the surface-atmosphere in connection with the manifestation of seismic activity in the Eastern Caucasus]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(2), 76-83. (In Russ.). doi: 10.35540/2686-7907.2020.2.07
- Saidov, O.A., & Daniyalov, M.G. (2007). [Hydrogen variations during major earthquakes in the Caucasus and adjacent territories]. In *Seismicheskii monitoring i izuchenie geodinamiki territorii Dagestana i akvatorii Srednego Kaspiia. Sbornik trudov N 1 DF GS RAN* [Seismic monitoring and study of the geodynamics of the territory of Dagestan and the water area of the Middle Caspian. Collection of works №1 DD GS RAS. Editors R.A. Levkovich, A.Sh. Ismailov] (pp. 129-135). Makhachkala, Russia: Epokha Publ. (In Russ.).
- Saidov, O.A., Suleimanov, A.I., Kasumov, G.A., & Vorontsova, T.M. (2007). [Results of regime observations of the parameters of underground water-gas systems of the seismically active region "Dagestan Wedge"]. In *Seismicheskii monitoring i izuchenie geodinamiki territorii Dagestana i akvatorii Srednego Kaspiia. Sbornik trudov N 1 DF GS RAN* [Seismic monitoring and study of the geodynamics of the territory of Dagestan and the water area of the Middle Caspian. Collection of works №1 DD GS RAS. Editors R.A. Levkovich, A.Sh. Ismailov] (pp. 140-148). Makhachkala, Russia: Epokha Publ. (In Russ.).
- Saidov, O.A., Taimazov, D.G., Magomedov, S.R., Magomed-Kasumov, M.G., Sharapudinov, T.I., & Sultanakhmedov, M.S. (2020). [Comparative analysis of geochemical time series and seismic regime of Dagestan territory]. *Trudy Instituta geologii DFITs RAN* [Proceedings of the Institute of Geology of DFRC RAS], 2(81), 57-69. (In Russ.). doi: 10.33580/2541-9684-2020-81-2-57-69
- Taimazov, D.G. (2011). On the possibility of constructing a multicomponent trench-type deformometric station for seismic forecasting. *Seismic Instruments*, 47(1), 24-29. doi: 10.3103/S0747923911010154
- Taimazov, D.G. (2020b). [On the possibility of predicting earthquakes from repeated areal observations of high-frequency seismic noises]. *Trudy Instituta geologii DFITs RAN* [Proceedings of the Institute of Geology of DFRC RAS], 4(83), 75-81. (In Russ.). doi: 10.33580/2541-9684-2020-83-4-75-81
- Taimazov, D.G. (2021). [Scale invariance of earthquake parameters and a possible algorithm for their prediction]. *Trudy Instituta geologii DFITs RAN* [Proceedings of the Institute of Geology of DFRC RAS], 1(84). In press (In Russ.).
- Taimazov, D.G., & Taimazov, M.D. (2017). [Scanning resonance seismic receiver]. Patent RF, no. 2635399. (In Russ.).
- Taimazov, D.G., & Taimazov, M.D. (2018a). [Method for predicting tectonic earthquakes]. Patent RF, no. 2660771. (In Russ.).
- Taimazov, D.G., & Taimazov, M.D. (2018b). [Method for reconstructing dynamic processes in the earth's crust based on seismic observations]. Patent RF, no. 2659452. (In Russ.).
- Taimazov, D.G., & Taimazov, M.D. (2018c). [Broadband resonant seismoacoustic receiver]. Patent RF, no. 2660768. (In Russ.).
- Taimazov, D.G., Sharapudinov, T.I., Magomed-Kasumov, M.G., & Sultanakhmedov, M.S. (2016). [Construction the transfer function between time series based on the relative amplitudes of coherent harmonics]. Patent RF, no. 2016661714. (In Russ.).
- Taimazov, D.G., Sharapudinov, T.I., Magomed-Kasumov, M.G., & Sultanakhmedov, M.S. (2018). [Reconstruction of geodynamic processes based on seismic observations]. Patent RF, no. 2018616052. (In Russ.).
- Taimazov, D.G., Sirazhudinov, M.M., & Kadiev, R.I. (2016). [Detector of deformation anomalies parameters in the earth's crust based on areal observations of geofields]. Patent RF, no. 2016663005. (In Russ.).

Information about authors

Magomedov Khaskil Dzharulaevich, director of the Dagestan Division of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (DD GS RAS), Makhachkala, Russia. E-mail: haskil@dbgsras.ru

Taimazov Djamaludin Gadjevich, PhD, Scientific Secretary of the DD GS RAS, Makhachkala, Russia; Senior Researcher of the Institute of geology (IG) of the Dagestan Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (DFRC RAS), Makhachkala, Russia. E-mail: dtaim@dbgsras.ru

Adilov Zarakhman Ashuralievich, Deputy Head of Department of the DD GS RAS, Makhachkala, Russia. E-mail: adilov79@mail.ru

Magomed-Kasumov Magomedrasul Grozbekevich, PhD, Deputy Director of the DD GS RAS, Makhachkala, Russia; Senior Researcher of the Department of Mathematics and Informatics of the DFRC RAS, Makhachkala, Russia. E-mail: rasuldev@gmail.com