

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЭНДОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ

К.С. Непеина¹, А.К. Рыбин¹, П.Н. Александров², П.А. Казначеев³

¹Научная станция РАН в г. Бишкеке, rybin@gdirc.ru

²ЦГЭМИ ИФЗ РАН, alexandr@igemi.troitsk.ru

³Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, pak@ifz.ru

АННОТАЦИЯ

Исследование посвящено результатам серии экспериментов наблюдения за динамикой электромагнитного и сейсмического полей эндогенного происхождения. В свою очередь, изменения в энергетических характеристиках геофизических полей эндогенного происхождения могут рассматриваться как интегральный отклик геологической среды на региональные и локальные современные геодинамические процессы, одновременно воздействующие на такой сейсмоактивный регион как Тянь-Шань и быть связаны с необратимыми деформациями (трещинообразованием). Предполагается, что существуют связи между деформационными и потенциальными полями в геологической среде. В основе лежит гипотеза о порождении процесса трещинообразования с испусканием сигналов импульсного типа сейсмоакустической эмиссии (САЭ) и электромагнитного излучения (ЭМИ). В результате отработанной методики получена количественная оценка изменений, происходящих в литосфере Тянь-Шаня через поведение геофизических полей с формализованной информацией о состоянии геосреды, например, изменением энергетических характеристик поля эндогенного происхождения с осреднением за 1 час наблюдений. Проведена обработка полевых магнитотеллурических и сейсмических данных по выделению компонент наблюдаемых полей эндогенного происхождения для мониторинговых пунктов наблюдений Северного Тянь-Шаня. Установлена причинно-следственная связь энергетических характеристик электромагнитного и сейсмического полей эндогенного происхождения с суточными лунно-солнечными приливами. Обнаружена высокая чувствительность энергетической характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения к сильным ($K > 10$) или близким (в радиусе 50 км) землетрясениям, произошедшим в период проведения сейсмоэлектромагнитного мониторинга на территории Северного Тянь-Шаня. Предложены пути развития данной методики.

Ключевые слова: электромагнитное поле эндогенного происхождения, современные геодинамические процессы, геофон, градиентная установка

ВВЕДЕНИЕ

При современных геодинамических процессах в геосреде происходят обратимые и необратимые деформационные процессы (Соболев, 2002; Куксенко и др., 2010 и др.). Под необратимыми деформациями понимаются неупругие (разрывные) деформации, которые приводят к нарушению сплошности горной породы за счет разрушения атомных связей и сопровождаются генерацией геофизических полей различной природы. Эти процессы генерируют источники эндогенного происхождения как электромагнитного, так и сейсмического полей (Гохберг и др., 1988; Соболев, 1993).

Результаты численного моделирования электромагнитного поля эндогенного происхождения со случайным распределением местоположения, амплитуды и направления электрических диполей показали, что при

увеличении количества источников в единицу времени пространственная аномалия электромагнитного поля эндогенного происхождения сужается, а амплитуда напряженности электрического поля при этом увеличивается (Александров, 2009).

При дальнейшем рассмотрении мы переходим от рассмотрения квазигармонических полей в методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ) к понятию импульсных полей (путем прореживания наблюдаемого поля), и считаем, что измеренные поля содержат как магнитотеллурическое поле, так и добавку – поле эндогенного происхождения (Y).

Поле эндогенного происхождения – приходящее из нижнего полупространства по отношению к точке наблюдения. Предполагается, что оно обусловлено происходящими глубинными процессами и ассоциируется с ними, но не

обязательно отождествляется с самим эндогенным процессом. Также нами был встречен термин «эндогенного характера», означающий сопряженность зон уплотнения и разуплотнения горных пород на глубине. Речь идет о процессах, сходных с неравновесными фазовыми переходами, которые сопровождаются эволюцией структурных состояний.

Последнее время появились новые идеи и инструменты изучения геодинамической активности через анализ поведения этих полей во времени (Александров и др., 2018; Александров и др., 2018; Александров, Непеина, 2019; Баталев и др., 2019; Баталев и др., 2019; Казначеев, Непеина, 2019; Непеина и др., 2019). Совокупность наблюдений в определенных пунктах - одновременная фиксация электромагнитного и сейсмического полей эндогенного происхождения с целью определения динамики характеристик происходящих процессов эндогенного происхождения, будем называть сейсмоэлектромагнитным мониторингом (Непеина, 2021).

МЕТОДЫ

По методическому и техническому оснащению коллектив ИС РАН обладает рядом программных и измерительных средств.

Магнитотеллурическое зондирование

В качестве прибора измерения электромагнитного поля используется аппаратура Феникс MTU-5 (Phoenix Ltd., Canada) (Fox, 2001) с частотой измерений 15 Гц. Точность синхронизации около 1 микросекунды. В качестве повышения точности используются эталонировки и калибровки с проверкой на идентичность комплектов аппаратуры, осуществляемых до начала полевых работ ежесезонно, а также существующий набор патентов ИС РАН (Лосихин и др., 2013; Дзалба, Баталев, 2017; Дзалба и др., 2019; Дзалба, Тимонин, 2021). Сами пункты наблюдений находятся вдали от промышленных помех. Для передаточных функций МТЗ для Северного Тянь-Шаня ошибка измерений составляет 1-2 % по амплитуде и $0.5-0.8^\circ$ по фазе (Рыбин и др., 2008). При выставлении индукционных датчиков по буссоли в ортогональных направлениях ошибка менее $\pm 1^\circ$. По напряженности электрического поля точность достигает 1-2 %. Чувствительность индукционных датчиков 25 мВ/нТл. Для надежной регистрации сигналов магнитной индукции амплитудой менее 1 пТл требуется высокий коэффициент

преобразования (50–100 мВ/нТл). По результатам наблюдений рассчитывается трехмерное распределение среднеамплитудных значений электромагнитного поля эндогенного происхождения для набора заданных частот (рис. 1) и энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения (рис. 2).

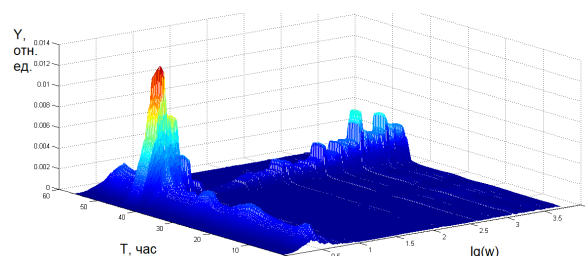


Рисунок 1. Трехмерное распределение среднеамплитудных значений электромагнитного поля эндогенного происхождения в частотно-временной области для записей пункта ГМТЗ 900.

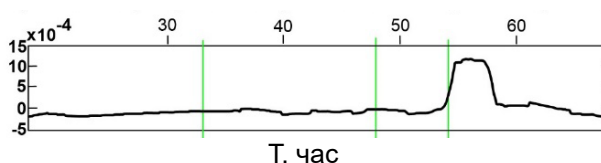


Рисунок 2. Энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения (пункт ГМТЗ 900).

Сейсмическая градиентная установка

В 2017 г. разработан и реализован аппаратно-программный комплекс по регистрации сейсмического поля градиентной установкой на основе 18-канальной измерительной станции с коммутатором AIMUX32C-2 и аудио-АЦП (Казначеев и др., 2019). Однако, в данный момент ведутся работы по её совершенствованию в связи с изношенностью и возможным расширением числа геофонов до 21 штуки. Каждый сейсмоприемник представляет собой комбинацию из 3-х однокомпонентных велосиметров GS-20DX производства Geospace, скомпонованных на посадочной площадке во взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 3). Таким образом, один велосиметр измеряет колебания в вертикальной плоскости и два других – в горизонтальной. Общий вид записей представляет собой регистрацию шумоподобного сейсмического поля. Формальная теория фильтрации сейсмического поля по направлению распространения строится на понятии вектора градиента, указывающего направление наибольшего возрастания некоторой величины от одной точки пространства к другой (скалярного поля). Таким образом, эта установка

позволяет вычислять пространственные производные на основе трехкомпонентной регистрации сейсмического поля, что повышает надежность выделения поля эндогенного происхождения. По результатам наблюдений рассчитывается энергетическая характеристика сейсмического поля эндогенного происхождения (рис. 4).

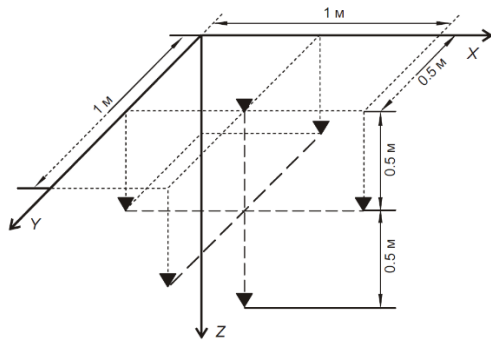


Рисунок 3. Общий вид градиентной установки регистрации сейсмоакустического сигнала. Плоскость XY соответствует дневной поверхности, ось Z направлена вниз. ▼ – трехкомпонентные датчики (Казначеев и др., 2019).

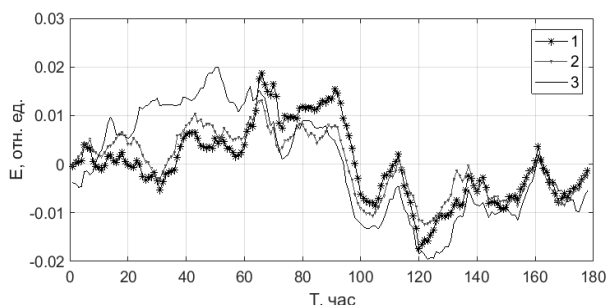


Рисунок 4. Результаты оценки энергетической характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения за вычетом среднего с дополнительным сглаживанием для каждой из компонент (линии 1 - x, 2 - y, 3 - z) на территории Научной станции РАН в период 13.09.2018 (09:26 UTC) - 27.09.2018 (22:43 UTC).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполнения исследований получены следующие результаты:

- Определены тензочувствительные зоны Северного Тянь-Шаня для проведения синхронных электромагнитных и сейсмических наблюдений;
- Реализована методика электромагнитных наблюдений современных геодинамических процессов литосферы Северного Тянь-Шаня;
- Реализована методика сейсмических наблюдений, основанная на фильтрации наблюдаемого сейсмического поля по направлению его распространения и анализе

рассчитанной энергетической характеристики (интенсивности) этого поля;

- Получены синхронные наблюдения (ограниченные 3-7 сутками) сейсмического и электромагнитного поля в тензочувствительных зонах Северного Тянь-Шаня;
- Проведена обработка полевых магнитотеллурических и сейсмических данных по выделению компонент наблюдаемых полей эндогенного происхождения;
- Сформирован статистически значимый массив энергетических характеристик электромагнитного и сейсмического полей эндогенного происхождения для мониторинговых пунктов наблюдений Северного Тянь-Шаня;
- Установлена причинно-следственная связь энергетических характеристик электромагнитного и сейсмического полей эндогенного происхождения с лунно-солнечными приливами в отдельных пунктах на территории Северного Тянь-Шаня;
- Обнаружена высокая чувствительность энергетической характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения к сильным ($K > 10$) или близким (в радиусе 50 км) землетрясениям, произошедшим в период проведения сейсмоэлектромагнитного мониторинга на территории Северного Тянь-Шаня.

Сопоставление поведения энергетических характеристик сейсмического поля эндогенного происхождения с сейсмическими событиями

Измерения сейсмического поля градиентной установкой на территории Научной станции РАН были начаты 1 августа 2018 г. в 16 час. 04 мин. (UTC+6). Результаты обработки первых записей на территории НС РАН показаны на рисунке 5. Отметим, что наиболее близкое к НС РАН землетрясение ($R=26$ км) произошло 06.08.2018 в 00 час. 13 мин. по Гринвичу. Место, где расположена НС РАН, имеет координаты $\lambda=42.68^\circ$ с.ш. и $\phi=74.69^\circ$ в.д. На графике (рис. 5) землетрясение попадает на момент времени 114 час, где амплитуда энергетической характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения отмечается резким падением амплитуды до двух единиц. Энергетический класс события низкий $K=6.60$. Другое землетрясение, представляющее интерес – наиболее мощное ($K=11.33$, 151 час на рис. 5). Несмотря на то, что оно находится в 260 км от НС РАН, в поведении линий энергетической характеристики эндогенной компоненты сейсмического поля наблюдается значительный

«срыв» непосредственно перед произошедшим землетрясением.

ОБСУЖДЕНИЕ

Реализация подхода относится к рассмотрению методического вопроса и требует дальнейшего исследования. На данный момент реализованы расчеты статистических значений достоверности сходства сейсмических записей и способность провести предварительный анализ данных для отбраковки некоторых отрезков записи (Казначеев, Непеина, 2021; Казначеев и др., 2021).

В плане развития данного направления необходимо:

- Проведение синхронных наблюдений тремя комплектами аппаратуры Феникс МТУ-5. Оценить степень подобия энергетических характеристик электромагнитного поля эндогенного поля как для разнесенных в пространстве пунктов наблюдения, так и находящихся в одном пункте;
- Использование аудио-МТЗ и метод частотного зондирования (ЧЗ) для сравнения результатов. Проверить амплитудно-частотные характеристики индукционных датчиков и точности индукционных датчиков МТС-50, МТС-30. Подробное рассмотрение оценок направление согласованности измеряемых тангенциальных компонент и калибровочных записей наподобие (Thiede, Ramotoroko, Junge, 2020);
- Апробирование методики в платформенных областях;
- Совершенствование измерительной аппаратуры: увеличение количества градиентных установок с целью локализации областей активных необратимых процессов;
- Количественная оценка области и/или скорости развития необратимых процессов на основе разделения сейсмического поля на поперечные и продольные волны, которое позволяет количественно определить сдвиговые деформации и деформации сжатия-растяжения (вычисление ротора и дивергенции);
- Наблюдения вертикальной составляющей электрического поля;
- Усовершенствование расчетов энергетической характеристики вектора Y : делать пересчет импеданса нижнего полупространства с учетом изменения геоэлектрического разреза во времени.

БЛАГОДАРНОСТИ

Хочется отметить в памяти роль безвременно ушедшего от нас коллеги Баталева Владислава Юрьевича, который внес определенный вклад в

изучение современных геодинамических процессов на Тянь-Шане.

Исследование ведется при поддержке РФФИ № 20-05-00475 «Теория и практика создания системы сейсмо-электромагнитного мониторинга геодинамической активности литосферы Тянь-Шаня».

ЛИТЕРАТУРА

- Александров ПН, 2009 К теории сейсмического и электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, № 2, Вып. 14, с 49-58.
- Александров ПН, Непеина КС 2019 Программа обработки данных регистрации сейсмических данных, зарегистрированных градиентной установкой. RU 2019618936.
- Александров ПН, Рыбин АК, Забинякова ОБ, 2018 Разделение электромагнитного поля по положению источников в методе МТЗ. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, Т. 160, № 2, с 339-351.
- Баталев ВЮ, Баталева ЕА, Матюков ВЕ, Рыбин АК, 2019 Изучение необратимых деформаций в литосфере Тянь-Шаня по магнитотеллурическим данным (методологический аспект). Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. № 2, Вып. 42, с 42-56. doi 10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56.
- Баталев ВЮ, Баталева ЕА, Рыбин АК, Александров ПН, Матюков ВЕ, Непеина КС, Забинякова ОБ, Казначеев ПА, 2018 Теоретические обоснования исследований деформационных процессов в литосфере земли на основе сейсмических и электромагнитных полей эндогенного происхождения. Математическое моделирование процессов и систем. Ред. С.А. Мустафина. Стерлитамак: БашГУ, с 95-122.
- Баталева ЕА, Баталев ВЮ, Рыбин АК, 2015 Взаимосвязь аномалий электропроводности, скоростных характеристик и режима сейсмичности литосферы Центрального Тянь-Шаня. Литосфера, № 5, с 81-89.
- Баталева ЕА, Мухамадеева ВА, 2018 Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон). Геодинамика и тектонофизика, № 2, с 461-487.
- Баталева ЕА, Рыбин АК, Баталев ВЮ, 2014 Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженного состояния среды. Геофизические исследования, Т. 15, № 4, с 54-63.

Гохберг МБ, Моргунов ВА, Похотелов ОА, 1988 Сейсмoeлектромагнитные явления. М.: Наука, 175 с.

Дзалба АЛ, Баталев ВЮ, 2017 Электрод для высокочастотной геофизической электроразведки. RU 175972 U1.

Дзалба АЛ, Матюков ЕК, Тимонин ГН, 2019 Стабилизация влагонасыщенности неполяризующихся электродов. RU 2701876 С1.

Дзалба АЛ, Тимонин ГН, 2021 Шаблон для азимутально-горизонтальной установки геофизических индукционных датчиков. RU 204542.

Казначеев ПА, Матюков ВЕ, Александров ПН, Непеина КС, 2019 Разработка и опробование трехкомпонентной градиентной установки для регистрации сейсмоакустического поля в геодинамически активных регионах. Сейсмические приборы, Т. 55, № 1, с 46-58. doi: 10.21455/si2019.1-3.

Казначеев ПА, Непеина КС, 2019 Программа для синхронной регистрации сигналов в многоканальная коммутация на вход одиночного аналого-цифрового преобразователя. RU 2019618732.

Казначеев ПА, Непеина КС, 2021 Программа для оценки стационарности ряда сейсмоакустических данных, зарегистрированных трехкомпонентной градиентной установкой, и их подготовки для дальнейшей обработки. RU 2021613266.

Казначеев ПА, Непеина КС, Александров ПН, 2021 К методике анализа возможной связи лунно-солнечных приливов, активности эндогенного источника магнитотеллурического поля и величины сейсмоакустического сигнала в геодинамически активных областях. Тезисы VIII Междунар. Симпозиума. Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. Бишкек: ИС РАН. с 180.

Куксенко ВС, Махмудов ХФ, Манжиков БЦ, 2010

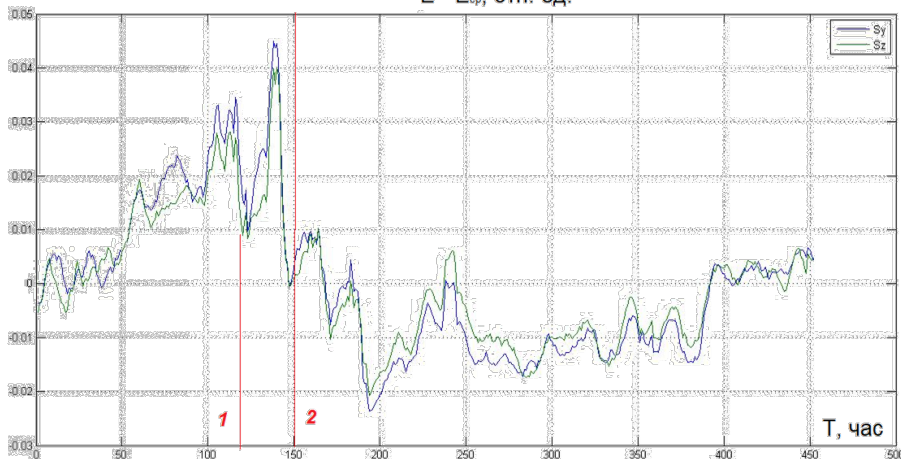


Рисунок 5. Графики энергетической характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения, полученные по компонентам S_y и S_z на территории ИС РАН.

Концентрационная модель разрушения твердых тел и прогнозирование катастрофических ситуаций крупномасштабных объектов. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, № 4, с 29-34.

Лосихин ЛН, Матюков ЕК, Пазников ВА, Петров ПП, Тимонин ГН, 2013 Неполяризующийся электрод для наземной геофизической электроразведки / Патент на полезную модель RU 123979 U1.

Непеина КС, 2021 Сейсмoeлектромагнитный мониторинг современных геодинамических процессов литосферы Северного Тянь-Шаня. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М: МГУ

Непеина КС, Казначеев ПА, Александров ПН, 2019 Сейсмический мониторинг современных геодинамических процессов с использованием градиентной установки. Вестник КРАУНЦ, Вып. 44, № 4, с 84-92

Рыбин АК, Спичак ВВ, Баталев ВЮ, Баталева ЕА, Матюков ВЕ, 2008 Магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня. Геология и геофизика, Т. 49, № 5, с 445-460.

Соболев ГА, 1993 Основы прогноза землетрясений. Ред. А.В. Николаев. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 313 с.

Соболев ГА, 2002 Динамика разрывообразования и сейсмичность. Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, с 67-78.

Fox L, 2001 Satellite-Synchronized 3-D Magnetotelluric System. U.S. Patent № 6 191 587 B1, issued 20.02.2001.

Thiede A, Ramotoroko CD, Junge A, 2020 Combined multivariate MT Processing for MTU (Phoenix) and ADU (Metronix) Measurement Systems. Schmucker-Weidelt-Kolloquium für Elektromagnetische Tiefenforschung, p 58-65. gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_5001491