

УДК 550.34

Прокопенко С.И.¹, Богданов Ю.А.², Калысова Ж.К.³¹КГТУ им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызстан²Hebei DSF-GEOS Technology Co., Ltd,
г. Чжанцзякоу, Китай³Институт сейсмологии НАН КР,
г. Бишкек, Кыргызстан

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КАНАЛОВ ЭНЕРГОПЕРЕНОСА В АКТИВНОЙ ЗОНЕ КАРАКУНУЗСКОГО РАЗЛОМА ПО ДАННЫМ GPTS И ИХ СВЯЗЬ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ГИПОЦЕНТРОВ

Аннотация. Классические подходы к оценке сейсмической опасности, основанные на моделировании разломов как планарных структур, всё чаще дополняются объёмными моделями, учитывающими сложную трёхмерную организацию очаговой зоны. В данном исследовании метод геополяритонной томографии (GPTS) впервые применён для визуализации каналов миграции тектонической энергии в активной зоне Каракунuzского разлома. Этот пассивный метод, основанный на регистрации естественного геополяритонного излучения, позволил получить высокодетальную томографическую модель, выявившую не только чёткое пространственное распределение гипоцентров на глубинах 5, 10 и 15 км, но и линейную зону повышенных напряжений в кристаллическом фундаменте. Полученные данные интерпретируются в рамках концепции объёмного сейсмического очага, где выявленная аномалия трактуется как основная ось эллипсоида напряжений, контролирующая пространственную организацию гипоцентров на его периферии. Результаты демонстрируют высокую согласованность с данными магнитотеллурического зондирования и сейсмических исследований, что подтверждает потенциал GPTS как эффективного неинвазивного инструмента для верификации объёмных моделей очаговых зон и уточнения сейсмического районирования.

Ключевые слова: Каракунuzский разлом; Чуйская впадина, сейсмическая опасность; гипоцентры землетрясений; геополяритонная томография (GPTS).

КАРАКУНУЗ ЖАРАКАСЫНЫН АКТИВДҮҮ ЗОНАСЫНДА ЭНЕРГИЯ ӨТКӨРҮҮ КАНАЛДАРЫН GPTS МААЛЫМАТТАРЫ БОЮНЧА ВИЗУАЛДАШТЫРУУ ЖАНА АЛАРДЫН ГИПОЦЕНТРЛЕРДИН МЕЙКИНДИКТИК ТАРАЛЫШЫНА БАЙЛАНЫШЫ

Кыскача мазмуну. Классикалык сейсмикалык коркунучту баалоо ыкмалары жаракаларды планардык түзүмдөр катары моделдөөгө негизделип келсе, акыркы жылдары очок аймагынын татаал үч өлчөмдүү уюшулушун эске алган көлөмдүү моделдер менен толукталууда. Бул изилдөөдө геополяритондук томография (GPTS) методу Каракунuz жаракасынын активдүү зонасында тектоникалык энергиянын миграция каналдарын визуалдаштыруу үчүн биринчи жолу колдонулду. Табигый геополяритондук нурланууну каттоого негизделген бул пассивдүү ыкма 5, 10 жана 15 км тереңдиктердеги гипоцентрлердин так мейкиндиктик таралышын гана эмес, ошондой эле кристаллдык фундаменттеги чыңалуунун жогорулаган сызыктуу зонасын да аныктоого мүмкүнчүлүк берди. Алынган маалыматтар көлөмдүү сейсмикалык очок концепциясынын алкагында интерпретацияланып, аныкталган аномалия гипоцентрлердин перифериялык жайгашуусун аныктаган чыңалуу эллипсоидинин негизги огун билдирет деп түшүндүрүлөт. Натыйжалар магнитотеллурикалык зонддоо жана сейсмикалык изилдөөлөрдүн маалыматтары менен жогорку шайкештикти көрсөтүп, GPTS ыкмасынын очок зоналарынын көлөмдүү

моделдерин верификациялоо жана сейсмикалык райондоштурууну тактоодо натыйжалуу, инвазивдүү эмес инструмент катары потенциалын тастыктайт.

Негизги сөздөр: Каракунуз жаракасы; Чүй өрөөнү; сейсмикалык коркунуч; жер титирөөнүн гипоцентрлери; геополаритондук томография (GPTS).

VISUALIZATION OF ENERGY-TRANSFER CHANNELS IN THE ACTIVE ZONE OF THE KARAKUNUZ FAULT BASED ON GPTS DATA AND THEIR RELATIONSHIP TO THE SPATIAL DISTRIBUTION OF HYPOCENTERS

Abstract. Classical approaches to seismic hazard assessment, which model faults as planar structures, are increasingly being complemented by volumetric models that account for the complex three-dimensional organization of the focal zone. In this study, the method of geopolariton tomography (GPTS) is applied for the first time to visualize the channels of tectonic energy migration within the active zone of the Karakunuz Fault. This passive method, based on the registration of natural geopolariton radiation, made it possible to obtain a highly detailed tomographic model that reveals not only the clear spatial distribution of hypocenters at depths of 5, 10, and 15 km, but also a linear zone of elevated stresses within the crystalline basement. The obtained data are interpreted within the framework of the volumetric seismic source concept, in which the identified anomaly is regarded as the principal axis of a stress ellipsoid that governs the spatial arrangement of hypocenters along its periphery. The results show strong consistency with magnetotelluric sounding and seismic survey data, confirming the potential of GPTS as an effective noninvasive tool for validating volumetric models of focal zones and refining seismic zoning.

Keywords: Karakunuz Fault; Chuy Basin; seismic hazard; earthquake hypocenters; geopolariton tomography (GPTS).

ВВЕДЕНИЕ.

От плоскости к объёму: современные представления о структуре сейсмического очага.

Классическая модель сейсмического очага, трактующая землетрясение как смещение по дискретной плоскости разлома, длительное время успешно объясняла основные наблюдаемые явления. Однако накопление данных высокого разрешения, таких как пространственных распределений гипоцентров, афтершоковых последовательностей и косейсмических деформаций, выявило систематические отклонения от упрощённой планарной модели очага. Всё больше исследований указывают на необходимость рассматривать очаг не как двумерную плоскость разрыва, а как сложный трёхмерный объём, в пределах которого процессы подготовки и реализации землетрясения контролируются структурой напряжений и пространственной неоднородностью горных пород [1].

Традиционно в сейсмологии и тектонофизике доминировала модель упругого отскока Рейда, положенная в основу теории двойной пары и концепции точечного источника. Однако повышение точности инструментальных данных показало, что геометрия реальных землетрясений значительно сложнее: распределение гипоцентров основных толчков и афтершоков нередко оказывается несовместимым с простой планарной конфигурацией.

Наблюдательные основания для перехода к объёмным моделям. Одним из ключевых аргументов в пользу объёмного подхода является кластеризация гипоцентров. Анализ каталогов землетрясений демонстрирует, что гипоцентры формируют трёхмерные облака различной формы — от сфероидальных до существенно неправильных, — что отражает объёмный характер разрушения.

Дополнительные доказательства представляют результаты кинематического и динамического моделирования очага. Косейсмический разрыв часто развивается по системе пересекающихся, ветвящихся и изгибающихся структур, формируя широкую зону деформации. Характерный пример — землетрясение Риджкрест (Калифорния, 2019), произошедшее на ортогональной системе разломов [2].

Существенное значение имеют явления «сейсмического затишья» и распределение asperities — прочных областей, аккумулирующих основную часть тектонических напряжений. Наличие внутри объема очага зон, бедных гипоцентрами, нередко указывает не на их пассивность, а на максимальную концентрацию напряжений [3].

Ключевые концепции объёмных моделей включают понятие «damage zone» — области повышенной трещиноватости, окружающей ядро разрыва и заметно влияющей на распространение волн, генерацию афтершоков и локальное перераспределение напряжений [4]. Наблюдение «Fault Zone Headwaves», распространяющихся вдоль низкоскоростных разломных зон, также подтверждает трёхмерную природу тектонических нарушений [5]. Более того, в рамках модели «Ready-to-Rupture Volume» очаг рассматривается как активируемый объём литосферы, в пределах которого разрыв может мигрировать, взаимодействуя с неоднородностями среды [6].

Развитие вычислительных методов позволило перейти к трёхмерному моделированию сейсмического цикла, учитывающему неоднородность фрикционных свойств, взаимодействие разломных систем и влияние флюидов. Такие модели воспроизводят наблюдаемые закономерности, включая кластерное распределение гипоцентров и сложную эволюцию афтершоковых последовательностей [7].

Мониторинг трёхмерной структуры: необходимость новых подходов

Переход к объёмным моделям имеет ключевое значение для прогноза афтершоков, оценки максимального ожидаемого землетрясения и сейсмического микрорайонирования. Он требует применения методов наблюдений, способных регистрировать глубинные процессы без существенного вмешательства в геологическую среду.

Одним из наиболее перспективных методов является геополяритонная томография (GPTS) — пассивная технология, основанная на регистрации сопряжённых упруго-электромагнитных мод. GPTS позволяет получать высокоинформативные данные о структуре и физических свойствах геологической среды без использования искусственных источников возбуждения [8]. Эффективность метода подтверждена региональными исследованиями, включая проект BlackSeaHazNet FP-7 EU, в рамках которого были выявлены зоны напряжений и особенности глубинной структуры, коррелирующие с активными разломами [9, 10].

Несмотря на достигнутые результаты, остаются открытыми вопросы, связанные с пространственной изменчивостью поляритонных мод вблизи активных разломов, а также с возможностью использования GPTS для анализа глубинных сейсмогенерирующих процессов.

Цель исследования настоящей работы заключается в апробации метода геополяритонной томографии (GPTS) для анализа пространственной изменчивости гипоцентров землетрясений и выявления влияния разломных структур на динамику глубинных процессов. Объектом исследования выбран профиль Бишкек–Токмак, пересекающий Каракурузский разлом вкрест простирания, что обеспечивает благоприятные условия для изучения влияния разломной тектоники на распределение напряжений и формирование волновых процессов.

Геология и тектоника. Район исследований расположен в центральной части Чуйской впадины – асимметричного межгорного прогиба, выполненного мощной (до 4.5–5 км) толщей палеоген-неогеновых континентальных отложений, под которыми залегает

палеозойский кристаллический фундамент [11]. Литологическая неоднородность осадочного чехла оказывает существенное влияние на характеристики сейсмических волн.

Тектонический каркас территории, согласно схеме районирования (рисунок 1), формируется системой активных разломов. Каракунузский разлом (1) является составным элементом активной конвергентной (коллизийной) тектонической обстановки Северного Тянь-Шаня и входит в состав Центрально-Чуйской флексурно-разломной зоны, маркируя переход от воздымающегося Киргизского хребта к погружающейся Чуйской впадине. С юга район ограничен Иссык-Атинским разломом (2) – системой надвигов, где породы хребта надвигаются на осадки впадины [11]. Также в пределах профиля выделяется Шамсинско-Тюндюкский разлом (3). Совокупное влияние этих структур создаёт сложную сейсмогеодинамическую обстановку. Пространственное распределение исторических землетрясений с энергетическим классом $K_R > 5.0$ (таблица 1, рисунок 1) [29] демонстрирует, что сейсмичность тяготеет к тектоническим границам, однако образует сложные трёхмерные кластеры, не сводимые к простым линейным зонам разломов. Это наблюдение указывает на необходимость перехода от планарных к более сложным моделям для адекватной оценки сейсмической опасности.

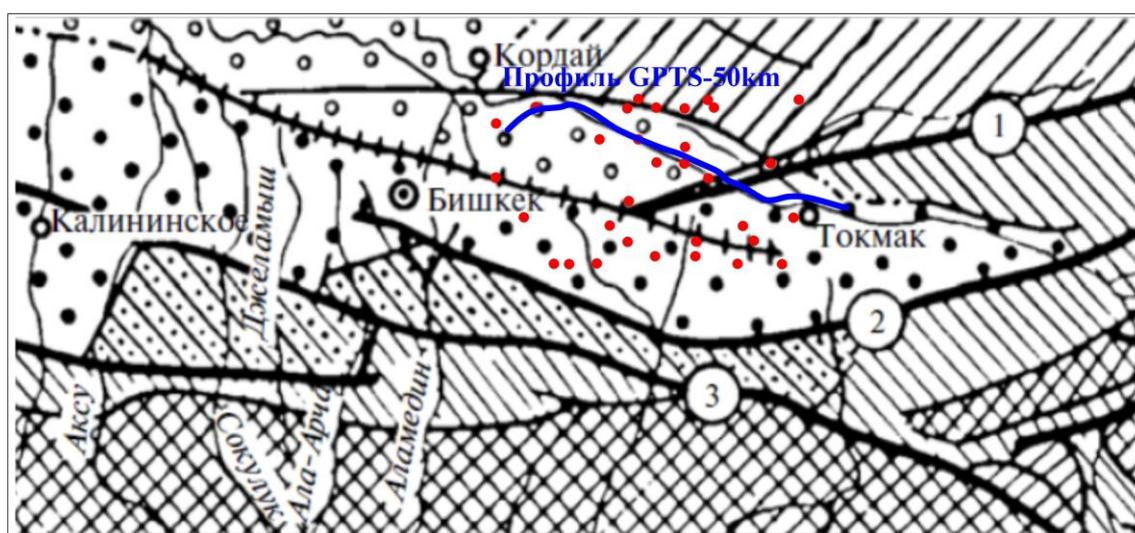


Рисунок 1. Схема районирования зоны сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта [12]. Цифры в кружочках: 1 – Каракунузский разлом, 2 – Иссык-Атинский разлом, 3 – Шамсинско-Тюндюкский разлом. Профиль GPTS обозначен синей линией. Эпицентры землетрясений энергетическим классом $K_R > 5.0$ в районе профиля обозначены красными точками.

Таблица 1 - Каталог сейсмических событий района [29].

Год	Мес	День	Час	Мин	Долгота, °	Широта, °	Глубина, км	Энергетический класс, K_R
1960	10	1	11	46	75.20	42.80		8.0
1960	10	28	10	49	75.10	42.80		10.9
1960	10	28	11	49	75.20	42.80		7.0
1961	11	13	6	41	74.82	42.97		8.0
1966	4	27	8	3	75.13	42.97		8.0
1967	3	19	18	19	75.10	42.78		8.1
1968	5	15	12	13	74.93	42.93		7.0
1970	4	25	14	16	75.12	42.88	15	10.0
1970	11	20	12	27	74.75	42.95		8.2

1970	11	23	11	54	74.75	42.88	10	6.5
1971	6	21	21	53	75.28	42.98	5	8.5
1972	1	8	14	31	75.27	42.83	15	8.3
1972	11	19	16	52	75.23	42.90	15	7.0
1973	1	8	0	57	75.20	42.80	15	6.9
1973	5	7	13	10	74.88	42.77	10	7.5
1973	6	28	12	9	75.08	42.97		7.3
1974	2	12	11	24	75.00	42.93		7.9
1974	2	14	10	7	75.00	42.98	10	8.0
1975	3	7	12	57	75.18	42.82	25	7.2
1978	6	19	15	28	75.08	42.90	10	7.3
1979	7	17	21	30	75.08	42.92	5	7.1
1979	8	13	4	42	74.98	42.80	10	6.8
1979	10	9	7	9	75.12	42.98	10	5.8
1979	12	3	3	4	74.80	42.83	5	7.1
1981	1	30	2	32	74.93	42.77	10	7.3
1982	2	8	9	48	75.03	42.78	20	6.7
1982	11	29	12	0	75.25	42.77		6.1
1983	2	22	5	35	75.03	42.90	5	7.7
1983	7	14	7	20	75.17	42.77		6.9
1983	9	10	10	30	74.98	42.97	10	5.7
1983	12	7	20	2	74.98	42.85		6.1
1984	4	2	20	49	74.85	42.77	10	5.3
1984	5	5	7	19	74.95	42.82	5	6.3
1984	10	13	4	54	75.03	42.97		5.9

Система GPTS. Физической основой GPTS является регистрация вторичного электромагнитного излучения, возникающего в напряжённо-деформированных горных породах в результате коллективных возбуждений кристаллической решётки [13]. Данное явление развивает фундаментальные представления о неравновесной динамике поляритонных систем, изучаемых в контексте сверхтекучего течения и неравновесной конденсации Бозе-Эйнштейна [14, 15].

Генерация излучения связана с процессами образования и аннигиляции дефектов (микротрещин, дислокаций) под действием тектонических напряжений, создающих локальные центры связи между механическим и электромагнитным полями [16]. Экспериментально подтверждено, что параметры электромагнитного отклика коррелируют с механическими свойствами пород [17], плотностью дефектов [18] и активируются при достижении критических напряжений [19].

Динамика процесса описывается системой кинетических уравнений:

$$\frac{dn}{dt} = K + (W^+ - W^-)n - \frac{n}{T}, \quad \frac{dU}{dt} = -\frac{U}{\tau} - (W^+ - W^-)n\Delta E,$$

где K - скорость накачки, W^+ и W^- - вероятности рождения и уничтожения дефектов, T и τ - времена жизни дефекта и релаксации волны, ΔE - энергия акта дефектообразования.

При превышении порогового условия ($KT > 1$) система переходит в режим устойчивой генерации когерентного излучения. Это объясняет пространственно-коррелированный характер геополяритонных сигналов, определяемый структурой дефектов решётки и напряжённым состоянием среды, что является основой для томографических реконструкций методом cross-корреляционного анализа.

Единый подход и связь с сейсмoeлектрическим эффектом. Метод GPTS основан на концепции сопряжённых полей (coupled fields), рассматривающей электромагнитные и механические процессы как взаимосвязанные проявления единого физического процесса. Накопление тектонических напряжений индуцирует в порообразующих минералах поляритонные моды, регистрируемые в электромагнитном спектре. Данный подход согласуется с современными исследованиями мультифизических систем, использующих взаимодействие полей для диагностики состояния среды [20, 21].

По физической сути GPTS близок к сейсмoeлектрическому эффекту [22, 23], но отличается существенно более широким частотным диапазоном. Если традиционный сейсмoeлектрический эффект ограничен областью 0.1-100 Гц, то регистрируемое излучение охватывает диапазон от единиц Гц до десятков кГц. Это расширяет диагностические возможности метода, позволяя одновременно изучать как глубинные низкочастотные процессы, так и локальные высокочастотные когерентные отклики в разломных зонах.

Техническая реализация метода. В основе метода лежит регистрация пространственного распределения амплитудно-частотных характеристик вторичного излучения. Переход от регистрируемых сигналов к томографическим изображениям осуществляется методами спектрального разложения (модифицированные функции Лагерра) и томографической инверсии с использованием корреляционного анализа. Данный подход позволяет картировать неоднородности механических свойств геологической среды, включая зоны ослабления и трещиноватости. Схематическая последовательность этапов геофизической съёмки представлена на рисунк 2.

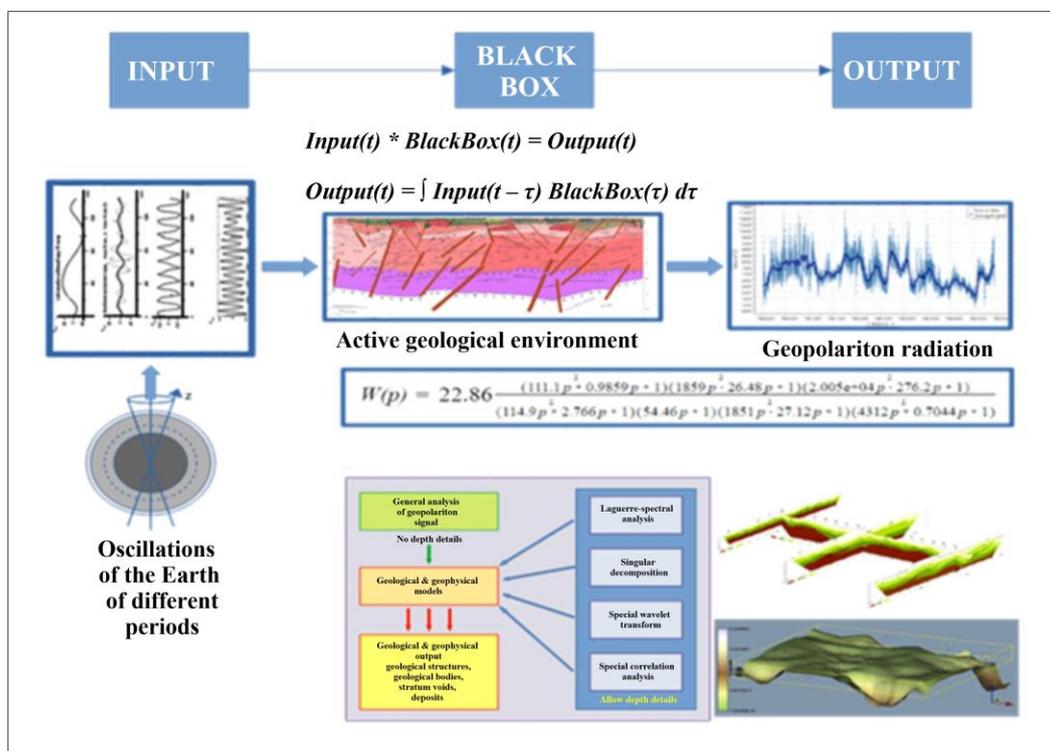


Рисунок 2. Блок-схема метода геополяритонной томографии (GPTS) [8].

Блок-схема метода (рисунок 2) представляет литосферу как динамическую среду, где собственные колебания Земли, модулируемые неоднородностями геологических структур, порождают когерентное излучение. Для выделения информативных особенностей применяется комплекс методов:

- Лагерр-спектральный анализ.
- Корреляционный анализ.

Интеграция результатов обработки с геолого-геофизическими моделями позволяет выявлять глубинные аномалии и идентифицировать зоны когерентного отклика, что имеет ключевое значение для задач сейсмического районирования.

Полевые исследования, методы, оборудование. Исследования выполнены вдоль профиля Бишкек–Токмак протяжённостью 50 км с шагом 3 м, пересекающего Каракурузский разлом поперек простирания. Применялся метод геополяритонной томографии (GPTS) с использованием системы DSF (Deep Subsurface Structure Survey System), оснащённой встроенным модулем GNSS, что обеспечило регистрацию сигналов с высокой пространственно-временной точностью [24]. Основные технические характеристики оборудования приведены в таблица 2.

Таблица 2 - Основные технические характеристики системы DSF.

Параметр	Значение
Рабочий частотный диапазон	1–100 кГц
Чувствительность	не менее 1×10^{-6} А/м
Точность позиционирования (GNSS)	не более 3.5 м

Примечание: система сертифицирована и защищена патентами (CN114814965B, 2022; CN114814958B, 2022).

Обработка данных. Обработка данных включала томографическую реконструкцию с использованием программного комплекса CorrSpeedSlice, основанную на корреляционном анализе когерентных участков профиля. Полученные GPTS-модели позволили построить детальные пространственные распределения физических параметров разреза.

Ключевым элементом обработки данных выступил Лагерр-спектральный анализ, обеспечивающий устойчивое выделение тонких спектральных особенностей геополяритонных сигналов на фоне шумов. Алгоритм (рисунок 3) включает предварительную обработку, выбор регуляризирующих параметров (α , β), разложение по модифицированным функциям Лагерра и итеративную оценку точности аппроксимации [25]. Это позволило детализировать аномальные зоны и проследить их структурные связи.

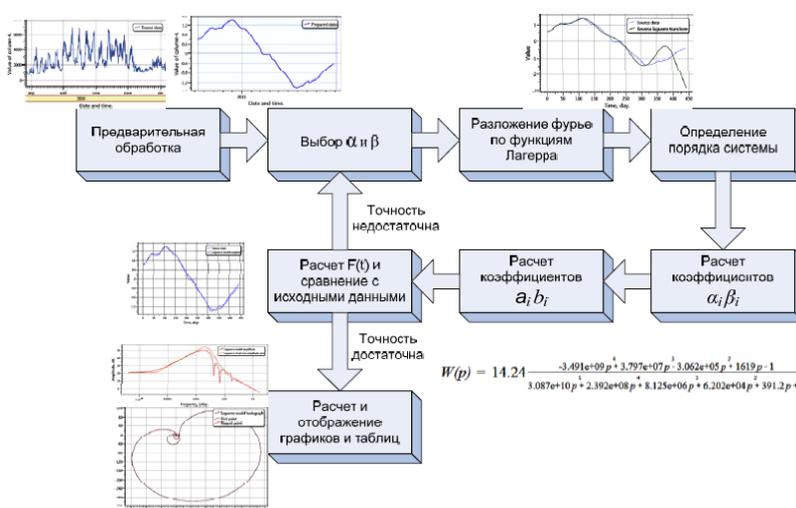


Рисунок 3. Блок-схема Лагерр-спектрального анализа, где: $W(p)$ передаточная функция в операторах Лапласа [25].

Верификация результатов проводилась путём сопоставления с данными сейсморазведки по эталонному профилю [27]. Установлено высокое соответствие

аномалий, выявленных методом GPTS, с независимыми сейсмическими моделями, что подтверждает достоверность и физическую обоснованность получаемых томографических реконструкций.

Результаты. В сентябре 2024 года вдоль профиля Бишкек–Токмак были проведены геофизические исследования методом GPTS, позволившие построить двумерную томографическую модель подповерхностного строения (рисунок 4). Алгоритм построения адаптирует принципы традиционной геофизической томографии для анализа параметров геополаритонных мод [26].

Модель демонстрирует неоднородное распределение физических параметров, связанных с упругими свойствами и трещиноватостью пород. На фоне общей неоднородности выявляется **линейная аномалия (голубая линия)**, интерпретируемая как **ось объёмного кластера повышенных напряжений**. Гипоцентры землетрясений (красные точки) формируют сложную трёхмерную структуру, тяготеющую к тектоническим нарушениям (красные линии) и периферии выявленной аномалии.

Внутренняя часть аномалии характеризуется относительно пониженной плотностью гипоцентров, что согласуется с моделью объёмного очага, где эта зона соответствует ядру накопления напряжений.

Отмечена временная миграция событий по периферии аномалии против часовой стрелки (1964–2024 гг.), отражающая постепенное перераспределение напряжений. Совпадение структур на обоих разрезах подтверждает их согласованность и наличие глубинной зоны, контролирующей локальную сейсмичность.

Полученная картина согласуется с современными подходами, рассматривающими сейсмический очаг как сложную объёмную систему [28].

Верификация результатов проводилась путём сопоставления с данными сейсморазведки по эталонному профилю [27]. Установлено высокое соответствие аномалий, выявленных методом GPTS, с независимыми сейсмическими моделями, что подтверждает достоверность и физическую обоснованность получаемых томографических реконструкций.

Результаты. В сентябре 2024 года вдоль профиля Бишкек–Токмак были проведены геофизические исследования методом GPTS, позволившие построить двумерную томографическую модель подповерхностного строения (рисунок 4). Алгоритм построения адаптирует принципы традиционной геофизической томографии для анализа параметров геополаритонных мод [26].

Модель демонстрирует неоднородное распределение физических параметров, связанных с упругими свойствами и трещиноватостью пород. На фоне общей неоднородности выявляется **линейная аномалия (голубая линия)**, интерпретируемая как **ось объёмного кластера повышенных напряжений**. Гипоцентры землетрясений (красные точки) формируют сложную трёхмерную структуру, тяготеющую к тектоническим нарушениям (красные линии) и периферии выявленной аномалии.

Внутренняя часть аномалии характеризуется относительно пониженной плотностью гипоцентров, что согласуется с моделью объёмного очага, где эта зона соответствует ядру накопления напряжений.

Отмечена временная миграция событий по периферии аномалии против часовой стрелки (1964–2024 гг.), отражающая постепенное перераспределение напряжений. Совпадение структур на обоих разрезах подтверждает их согласованность и наличие глубинной зоны, контролирующей локальную сейсмичность.

Полученная картина согласуется с современными подходами, рассматривающими сейсмический очаг как сложную объёмную систему [28].

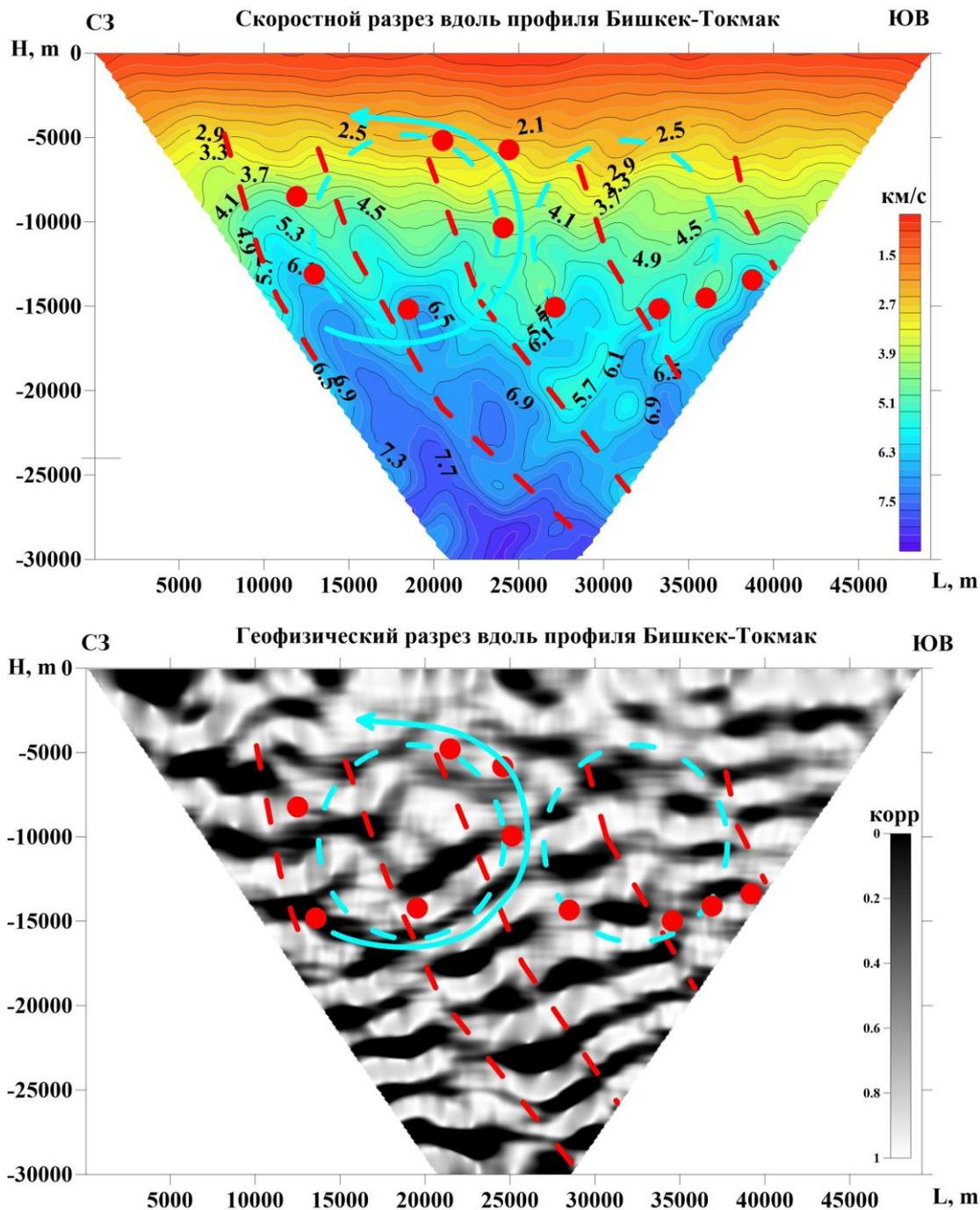


Рисунок 4. Томографическая модель подповерхностной структуры вдоль профиля Бишкек-Токмак, полученная методом GPTS. Красными линиями обозначены тектонические нарушения, красные точки – гипоцентры землетрясений, голубая линия – ось объёмного кластера напряжений.

Обсуждение. Результаты GPTS-профилирования выявили в Каракурузской разломной зоне осево-ориентированную аномалию, прослеживающуюся на глубинах 5–15 км. Пространственное соответствие этой аномалии распределению гипоцентров и данным независимых методов (МТЗ, сейсморазведка) подтверждает её интерпретацию как оси объёмного кластера напряжений, играющей ключевую роль в перераспределении тектонической энергии.

Выявленная структура согласуется с моделью объёмного сейсмического очага, где разрыв развивается в трёхмерном поле напряжений, а не ограничивается дискретной

плоскостью. Повышенная плотность гипоцентров по периферии аномалии соответствует представлениям о зонах концентрации деформаций вокруг оси максимальных напряжений.

С физической точки зрения, результаты подтверждают способность GPTS регистрировать поляритонные отклики, возникающие в условиях повышенной дефектности и напряжённого состояния пород. Однако интерпретация данных требует учёта локальных литологических особенностей и развития адекватных расчётных моделей.

Несмотря на существующие ограничения, метод GPTS демонстрирует высокую информативность для выявления структур, контролирующую пространственную организацию сейсмичности, и может существенно дополнить систему оценки сейсмической опасности региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование демонстрирует принципиальную новизну метода GPTS, заключающуюся в возможности визуализации осевых структур объёмных сейсмических кластеров. В отличие от традиционных подходов, фиксирующих преимущественно планарные элементы разломов, GPTS выявил устойчивую глубинную ось концентрации напряжений в Каракунузской разломной зоне на глубинах 5-15 км.

Ключевым результатом работы является установление пространственного соответствия между выявленной осевой аномалией и распределением гипоцентров, что подтверждает современные представления об объёмном характере сейсмического очага. Научная новизна метода проявляется в его способности регистрировать сопряжённые упруго-электромагнитные процессы, возникающие в зонах повышенной дефектности пород, что недоступно традиционным геофизическим методам.

Высокая согласованность результатов GPTS с данными МТЗ и сейсморазведки подтверждает физическую обоснованность метода и его диагностический потенциал. Полученные результаты создают основу для разработки новых подходов к сейсмическому районированию, учитывающих трёхмерную структуру очаговых зон.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием численных моделей генерации поляритонных процессов и интеграцией GPTS в системы комплексного геофизического мониторинга для повышения точности оценки сейсмической опасности в регионах современного горообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pandolfi, C., Taroni, M., De Nardis, R., Lavecchia, G., Akinci, A., & others. (2024). Advanced 3D seismic hazard analysis for active compression in the Adriatic Thrust Zone, Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22, 4221–4244.
2. Ross, Z. E., Idini, B., Jia, Z., et al. (2019). Hierarchical interlocked orthogonal faulting in the 2019 Ridgecrest earthquake sequence. *Science*, 366(6463), 346–351.
3. Wyss, M., & Wiemer, S. (2000). Change in the probability for earthquakes in southern California due to the Landers magnitude 7.3 earthquake. *Science*, 290(5495), 1334–1338.
4. Ben-Zion, Y., & Sammis, C. G. (2003). Characterization of fault zones. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3–4), 677–715.
5. Lewis, M. A., & Ben-Zion, Y. (2021). Imaging the structure of the San Andreas Fault with fault zone head waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2021JB022689.
6. Harris, R. A., & Day, S. M. (1993). Dynamics of fault interaction: Parallel strike-slip faults. *Geophysical Research Letters*, 20(20), 2211–2214.
7. Templeton, E. L., & Rice, J. R. (2008). Off-fault plasticity and earthquake rupture dynamics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B9).
8. Azimov, I. H., Bogdanov, Y. A., & Prokopenko, S. I. (2025). Study of deep structure and oil-gas bearing capacity of Tien Shan by GPTS method. *AIP Conference Proceedings*, 3276(1), 050001.

9. Bogdanov, Y. A., Pavlovych, V. N., & Prokopenko, S. I. (2013). The structure of earthquake hypocenters study by means of the analysis of the Earth electromagnetic radiation: Bulgaria examples. In *Complex research of earthquake forecasting possibilities, seismicity and climate change correlations (4th BlackSeaHazNet Workshop)* (Vol. 3, p. 12). Sofia, Bulgaria.
10. Bogdanov, Yu. A., Prokopenko, S. I. and Xin, Chen. (2020). Use of GPTS technology in geoinformation security for sustainable development of megacities. European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Theoretical and Applied Aspects2020, May 2020, Kiev, Volume 2020, 1–5.
11. Makarov, V. I., Mikolaichuk, A. V., & Chedia, O. K. (1995). Geology and recent tectonics of the Chuy basin (Northern Tien Shan). *Geotectonics*, 29(5), 437–450.
12. Abdrakhmatov, K. E., Kalysova, Zh. K., & Tilek kyzy, G. (2021). Structural position of earthquakes in the Chui Basin and its mountain frame. *Science, New Technologies and Innovations of Kyrgyzstan*, (4), 68–72.
13. Bogdanov, Y. A., Zakharov, I. G., Vashchenko, V. M., & Pavlovych, V. M. (2006). A study of depth structure of the Earth crust at the Antarctica coast by a geopolariton sounding technique. *Ukrainian Antarctic Journal*, 4–5, 102–108.
14. Nielsen, K. K., Ardila, L. A. P., Christiansen, O., & Bruun, G. M. (2020). Superfluid flow of polaron polaritons above Landau's critical velocity. *Physical Review Letters*, 125(3), 035301.
15. Shishkov, V. Y., Andrianov, E. S., & Lozovik, Y. E. (2022). Analytical framework for non-equilibrium phase transition to Bose–Einstein condensate. *Quantum*, 6, 719.
16. Bogdanov, Y. A., & Pavlovych, V. N. (2008). Nonequilibrium radiation of the Earth's crust as an indicator of geodynamic processes. *Geophysical Journal*, 30(4), 12–24.
17. Lin, P. (2021). Effect of rock mechanical properties on electromagnetic radiation waveform during rock fracturing. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(5), 2379–2393.
18. Li, X. (2022). Stress–electromagnetic radiation numerical model. *ACS Omega*, 7(51), 47437–47446.
19. Yoshida, S. (2004). Electromagnetic emissions from dry and wet granite under stress. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B9), B09204.
20. Eftaxias, K., Kaporis, P., Dologlou, E., Kopanas, J., Bogris, N., Antonopoulos, G., & Varotsos, P. (2004). Electromagnetic anomalies before earthquakes: A review of observations and mechanisms. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29(4–9), 273–288.
21. Uyeda, S., Nagao, T., & Kamogawa, M. (2009). Short-term earthquake prediction: Current status of seismo-electromagnetics. *Tectonophysics*, 470(3–4), 205–213.
22. Pride, S. R. (1994). Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. *Physical Review B*, 50(21), 15678–15696.
23. Butler, K. E. (2006). Seismoelectric methods for groundwater exploration. In Y. Rubin & S. Hubbard (Eds.), *Hydrogeophysics* (pp. 281–318). Springer.
24. Prokopenko, S. I. (2017). Application of passive geophysical scanner “DSF” for research of the deep structure of the Earth. In *Proceedings of the III International Conference “Actual Problems of Geological Medium and Probing Systems”* (pp. 51–52). Kyiv.
25. Bogdanov, Y. A., & Vodopianov, O. O. (2017). The use of Laguerre-spectral analysis in passive geopolariton tomography. In *Proceedings of the 3rd International Scientific Conference “Actual Problems of Geomedium and Sounding Systems”* (pp. 112–117). Kyiv.
26. Tarantola, A. (2005). *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*. SIAM, Philadelphia.
27. Zaharova, O. K., & Spichak, V. V. (2025). Neural-network modelling of temperature prediction at depth based on seismic sounding data. *Geophysical Research*, 26(1), 67–78.
28. Kagan, Y. Y. (2007). Earthquake spatial distribution: The correlation dimension. *Geophysical Journal International*, 168(3), 1175–1194. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03251.x>.
29. Каталог землетрясений Кыргызстана. // Фонды Института сейсмологии НАН КР.

Рецензент: к.т.н. Камчыбеков М. П.