



SIGNS OF AN UPCOMING SEISMIC EVENT ON THE BISHKEK GEODYNAMIC TEST AREA ACCORDING TO THE TRANSIENT ELECTROMAGNETIC MONITORING DATA

D.M. Evmenova ^{1,2✉}, Yu.A. Dashevsky ^{1,3}, I.N. Yeltsov ^{1,3,4}, A.K. Rybin ⁵, S.A. Imashev ⁵

¹ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6 Academician Lavrentiev Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

³ Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

⁴ Novosibirsk State Technical University, 20-1 Karl Marx Ave, Novosibirsk 630073, Russia

⁵ Research Station, Russian Academy of Science, Bishkek 720049, Kyrgyzstan

ABSTRACT. The RAS Research Station conducts geodynamic research on the Bishkek geodynamic test area (BGTA) using on-power time-lapse measurements of an unsteady electromagnetic field produced by a grounded electrical line.

In order to relate the electromagnetic monitoring signals to the recorded seismic events, the authors proposed the following characteristics (indicators):

- a) time of arrival of a maximum value signal at the observation point;
- b) voltage-time characteristics of the pulse;
- c) confidence interval for the average daily values of a signal.

The sensitivity of these indicators to seismic events was illustrated by the example of a swarm of seismic events ($K > 8$) recorded near the village of Kegety at the BGTA in April 2017. It has been found that, in the period of April 1–17, 2017, the time series of the three indicators contained no temporally synchronized anomalies. However, on April 18–20, 2017, all indicators showed the distinct temporally synchronized anomalies, which can be considered as precursors of the Kegety earthquake swarm whose main shock was recorded on April 21, 2017.

The paper substantiates the possibility of using the above-mentioned indicators for medium-term prediction of seismic events. In order to automate the processing of the time series, it is proposed to create a digital platform to analyze a long-term array of electromagnetic monitoring data from all observation points.

This paper starts a series of publications on the diffusion kinematics of non-stationary sounding in relation to the problems of electromagnetic monitoring of seismotectonic processes.

KEYWORDS: earthquake; transient electromagnetic technique; electromagnetic monitoring; seismic forecast; Bishkek geodynamic test area

FUNDING: The study was carried out as part of the state assignment of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS (project No. FWNM-2022-0004) and Research Station RAS, Bishkek (registration No. 1021052806454-2-1.5.1).



EDN: RMMWHF

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Darya M. Evmenova, pavlovadm@ipgg.sbras.ru

Received: August 31, 2024

Revised: December 11, 2024

Accepted: December 13, 2024

FOR CITATION: Evmenova D.M., Dashevsky Yu.A., Yeltsov I.N., Rybin A.K., Imashev S.A., 2025. Signs of an Upcoming Seismic Event on the Bishkek Geodynamic Test Area According to the Transient Electromagnetic Monitoring Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (2), 0817. doi:10.5800/GT-2025-16-2-0817

ПРИЗНАКИ ГОТОВЯЩЕГОСЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ НА ТЕРРИТОРИИ БИШКЕКСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА МЕТОДОМ СТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ

Д.М. Евменова^{1,2}, Ю.А. Дашевский^{1,3}, И.Н. Ельцов^{1,3,4}, А.К. Рыбин⁵, С.А. Имашев⁵

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6, Россия

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

³ Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

⁴ Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20/1, Россия

⁵ Научная станция РАН, 720049, Бишкек, Кыргызстан

АННОТАЦИЯ. На территории геодинамического полигона Научной станции РАН в г. Бишкеке (БГП) проводятся регулярные измерения нестационарного электромагнитного поля заземленной электрической линии в режиме включения тока.

Для выявления связей между сигналами электромагнитного мониторинга и зарегистрированными сейсмическими событиями авторами статьи впервые предложены следующие характеристики (индикаторы):

- а) время прихода максимального значения сигнала в пункт наблюдения;
- б) вольт-временная характеристика импульса;
- в) значение доверительного интервала для среднесуточных значений сигнала.

Чувствительность данных индикаторов к сейсмическим событиям проиллюстрирована на примере роя сейсмических событий ($K > 8$), зарегистрированных вблизи п. Кегеты на БГП в апреле 2017 г. Установлено, что в период 1–17 апреля 2017 г. временные ряды трех индикаторов не содержали синхронизированных во времени аномалий. Напротив, 18–20 апреля 2017 г. на временных рядах четко выделяются синхронизированные во времени аномалии указанных индикаторов, которые можно рассматривать в качестве предвестников Кегетинского роя землетрясений, основное событие в котором зарегистрировано 21 апреля 2017 г.

В статье обосновывается возможность использования перечисленных индикаторов для среднесрочного прогнозирования сейсмических событий. Для автоматизации обработки временных рядов предложено разработать цифровую платформу для анализа многолетнего массива данных электромагнитного мониторинга на всех пунктах наблюдений.

Данная работа открывает цикл исследований по изучению диффузионной кинематики нестационарных зондирований применительно к задачам электромагнитного мониторинга сеймотектонических процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землетрясение; метод становления поля; электромагнитный мониторинг; прогноз сейсмической активности; Бишкекский геодинамический полигон

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках госзадания ИВМиМГ СО РАН (проект № FWNM-2022-0004) и НС РАН в г. Бишкеке (№ 1021052806454-2-1.5.1).

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сейсмические события остаются одной из наиболее серьезных природных угроз [Bogomolov, Sycheva, 2022], что отражено в Приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. В частности, как критические обозначены технологии «предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Работы, посвященные проблеме прогноза сейсмического события, были представлены И.П. Добровольским [Dobrovolsky, 2004, 2010].

Для прогнозирования используются экспериментальные данные различных геофизических методов (сейсмических, магнитных, электромагнитных, анализ температурных вариаций, изменений объемной ак-

тивности почвенного радона, изменений в ионосфере и др.), рассматриваются предвестники сейсмического события, закономерности сейсмического процесса и изменения в состоянии земной коры, находящие отражение в геофизических полях [Bogomolov, 2012; Seminsky, Pospeev, 2022; Kozlova et al., 2021; Petrova, Kurova, 2023].

В качестве источников экспериментальных данных часто используются вариации кажущегося удельного электрического сопротивления, связанные с изменениями трещиноватости в геологической среде и распределения минерализованной пластовой воды в процессе подготовки сейсмического события. Для этого проводятся исследования на экспериментальных полигонах в сейсмоактивных районах. Первыми работами,

заложившими основу для развития электромагнитного мониторинга с целью прогнозирования сейсмических событий, стали труды О.И. Барсукова на Гармском прогностическом полигоне в 70-х годах прошлого века [Barsukov, Sorokin, 1973].

Экспериментальные полигоны представляют собой важный ресурс для научных исследований в области сейсмологии и обеспечивают основу для разработки и улучшения методов прогнозирования землетрясений, так как являются основными источниками экспериментальных данных, которые необходимы для анализа и понимания процессов, происходящих в земной коре в ходе развития сейсмического процесса [Gordeev et al., 2018; Sverdlik, 2019; Barsukov, Fainberg, 2019]. В США работы по анализу изменений в электрическом сопротивлении на экспериментальном полигоне проводятся в Калифорнии на разломе Сан-Андреас [Park, Fitterman, 1990; Park, 2002; Park et al., 2007; Cortés-Arroyo et al., 2018]. Работы проводятся также в Греции, Китае и Японии [Varotsos et al., 1993; Li et al., 1995; Mori et al., 1993] и других сейсмически активных регионах мира.

В результате многолетних наблюдений во многих регионах уверенно установлена причинно-следственная связь между местными землетрясениями и временными вариациями измеряемых на дневной поверхности характеристик электромагнитного поля. Дальнейшее продвижение по пути количественного описания этих связей вызывает значительные трудности. Например, не наблюдается устойчивой зависимости между величиной аномалии измеряемых величин и параметрами сейсмических событий.

Анализ состояния мониторинговых наблюдений в рамках электромагнитного метода в России и за рубежом позволяет говорить об окончании определенного этапа в развитии этой технологии: падает интерес к простому сопоставлению временной динамики электромагнитных и сейсмических событий на уровне

непосредственно регистрируемых величин и их функций – временных вариаций кажущегося сопротивления (методы постоянного тока), ЭДС в приемной петле (нестационарные поля), компонент электромагнитного поля (магнитотеллурические методы) – с одной стороны, времен возникновения и энергетического класса землетрясений – с другой. Такой подход не дает возможности выявлять области геологического пространства, максимально чувствительные к геодинамическому воздействию, и учитывать при анализе геологическое строение района мониторинга.

Сегодня существует настоятельная потребность в создании теории и методики, позволяющих соотносить сейсмические события непосредственно с изменениями геоэлектрического состояния среды в различных участках на различных глубинах, выделять в геологическом пространстве области, обладающие высокой интегральной тензоэлектрической чувствительностью по отношению к геодинамическим процессам.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для решения задач прогноза сейсмических событий в конце прошлого столетия был создан Бишкекский геодинамический полигон (БГП). Сегодня полигон функционирует на базе Научной станции РАН в г. Бишкеке (Кыргызстан). Основная задача работ, проводимых на БГП, заключается в выявлении связи между вариациями геофизических данных и сейсмической активностью вблизи пунктов наблюдения. Полигон располагается на территории Северного Тянь-Шаня – одной из наиболее сейсмоактивных областей Средней Азии [Bataleva, Mukhamadeeva, 2018].

На его территории расположены пункты наблюдения, на которых ежедневно проводятся измерения методом зондирования становлением поля с большими разносами с помощью установки «диполь – диполь» [Volikhin et al., 1993; Bataleva, Mukhamadeeva, 2018; Bragin,

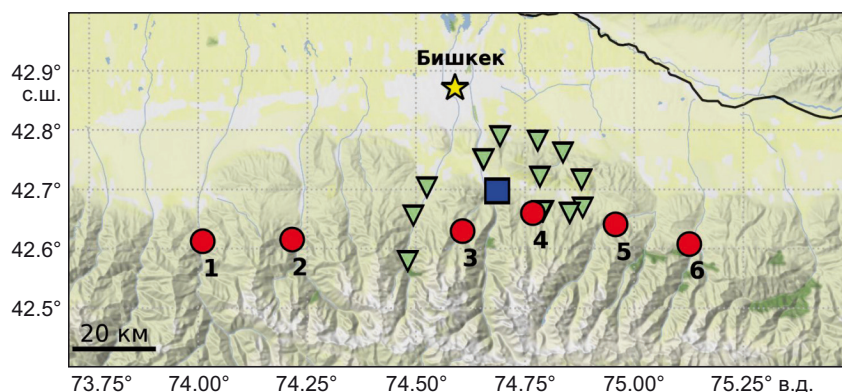


Рис. 1. Схема расположения пунктов электромагнитных наблюдений на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП).

Красным цветом обозначены стационары электромагнитного мониторинга (1 – Ак-Суу, 2 – Шавай, 3 – Чункурчак, 4 – Таш-Башат, 5 – Иссик-Ата, 6 – Кеgetы), зеленым – рядовые пункты, синий квадрат – питающий диполь ЭРГУ-600.

Fig. 1. Schematic location of electromagnetic monitoring sites on the area of the Bishkek geodynamic test site (BGT).

Red color shows stationary electromagnetic monitoring sites (1 – Ak-Suu, 2 – Chauvay, 3 – Chunkurchak, 4 – Tash-Bashat, 5 – Issyk-Ata, 6 – Kegety), green stands for intermediate sites, the blue square indicates current dipole ERGU-600.

Sverdlik, 2020]. В течение суток выполняется от одного до шести сеансов зондирования продолжительностью около 15 мин. Подавляющее большинство пунктов электромагнитного мониторинга приурочено к разломным структурам, в которых измерение временных вариаций электромагнитных полей позволяет дать количественную оценку напряженно-деформированного состояния геологической среды.

В настоящее время сеть насчитывает шесть стационарных (Ак-Суу, Шавай, Чункурчак, Таш-Башат, Иссык-Ата и Кегеты) и 14 нестационарных передвижных полевых пунктов наблюдения (рис. 1).

Остановимся на особенностях геоэлектрического строения полигона и в качестве примера выберем территорию пункта Ак-Суу. Геоэлектрический разрез по профилю Ак-Суу детально описан в работе [Bataleva, Mukhamadeeva, 2018] и отражает тектоническую обстановку в пункте мониторинга, расположенном в 57 км к западу от генераторного диполя. На этом участке отмечается наличие пород с низким удельным сопро-

тивлением (4–50 Ом·м). Высказывается гипотеза о присутствии здесь палеозойских отложений, разбитых на трещиноватые мелкие блоки и частично заполненных флюидами. Считается, что породы низкого сопротивления (до 50 Ом·м) трассируют разлом на глубине, который под углом 70° достигает глубины 10 км. Далее на глубине ~13 км фиксируется горизонтальная зона трещиноватых пород с низким сопротивлением (~19 Ом·м), называемая в литературе «средним» слоем. В верхней части разреза к югу от Шамси-Тюндюкского разлома породы палеозоя имеют высокое сопротивление (до 2000 Ом·м). Формулируется утверждение, что у гранитоидов, залегающих на этих глубинах (7–9 км), отсутствует трещиноватость и флюидонаполнение [Bataleva, Mukhamadeeva, 2018].

В качестве тензочувствительного элемента рассматриваются отложения, характеризующиеся трещиноватостью и флюидонасыщенностью (рис. 2; табл. 1).

Для выявления связи между данными электромагнитного мониторинга и сейсмическими событиями

Таблица 1. Геоэлектрические параметры модели M1
Table 1. Goelectrical parameters of model M1

Номер слоя	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Мощность слоя, м
1	50	1000
2	880	8800
3	10–60	7000
4	120	

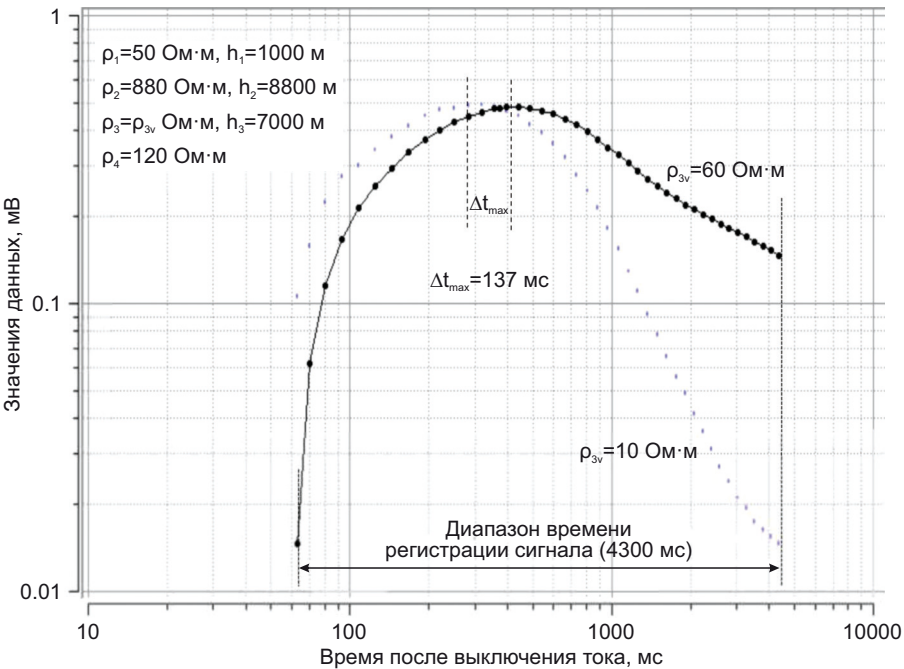


Рис. 2. Зависимость амплитуды максимума и времени прихода максимума сигнала в пункт Ак-Суу от значения электрического сопротивления третьего слоя в модели M1.
Fig. 2. Dependence of maximum amplitude and the time of maximum signal arrival at the Ak-Suu site on the third-layer electric resistivity value in model M1.

предлагается использовать следующие характеристики (индикаторы) измеряемых сигналов:

1. Время прихода максимального значения сигнала в пункт наблюдения. Индикатор отображает изменение удельного электрического сопротивления горных пород, характеризующихся трещиноватостью и флюидонасыщенностью. Из данных, показанных на рис. 2, следует, что при вариации удельного сопротивления от 10 до 60 Ом·м время прихода максимума изменяется на 137 м (от 298 до 435 мс). Следует особо подчеркнуть, что амплитуда максимума изменяется при этом всего на 2 % (от 0.491 до 0.481 мВ), что сопоставимо с погрешностью измерения среднесуточного сигнала. По чувствительности к вариациям удельного сопротивления амплитуда максимума оказывается менее информативной по сравнению с фазовой характеристикой максимума (время прихода).

2. Вольт-временная характеристика импульса, которая является аналогом площади максимума, также зависящая от удельного электрического сопротивления трещиноватого слоя и для удобства работы с полевым материалом введенная следующим образом:

$$VBX = \sum_{i=1}^N t_i \cdot \Delta U(t_i), \quad (1)$$

где N – количество временных отсчетов $\Delta U(t_i)$ на полевой кривой зондирования ($N=44$).

3. Средний доверительный интервал среднесуточных наблюдений. Если в течение текущих суток геологическая среда подвергается тектоническому воз-

действию вследствие готовящегося землетрясения, то режимные измерения, производимые в течение этого времени, нельзя считать реализациями случайного процесса. В этом случае вычисленные стандартным способом [Knyazev, Cherkassky, 1996] значения статистических характеристик теряют свою исходную интерпретацию и могут служить индикатором наступающего сейсмического события.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На примере роя сейсмических событий с энергетическим классом более 8, зарегистрированных вблизи пункта наблюдения Кегеты на Бишкекском прогностическом полигоне в апреле 2017 г., были рассмотрены геофизические возможности патентуемых характеристик измеряемого сигнала. Самое мощное событие, произошедшее 21 апреля 2017 г. в 00:55:43 по местному времени, имело следующие параметры: энергетический класс 11.67, глубина очага 12 км, расстояние от эпицентра до режимного пункта Кегеты 3.5 км.

Совместный анализ приведенных на рис. 3 данных позволяет сделать следующие выводы:

1. В период с 3 по 17 апреля 2017 г. временные ряды трех описанных выше индикаторов практически не содержат синхронизированных во времени аномалий амплитуды, которые можно было бы рассматривать в качестве предположительного отклика геологической среды на подготовку сейсмотектонического события.

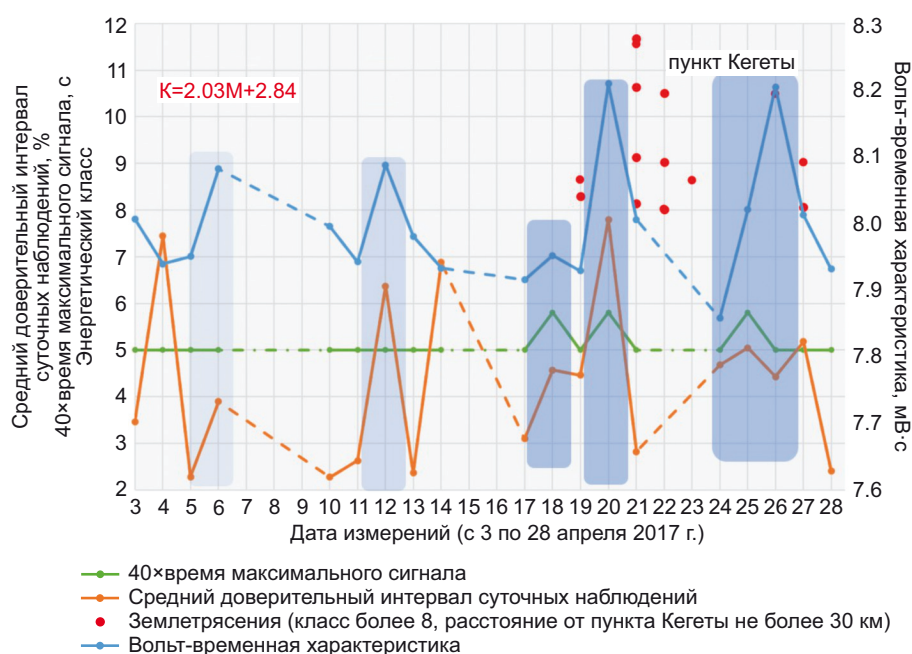


Рис. 3. Временная динамика среднесуточных индикаторов сейсмического события (средний доверительный интервал, вольт-временная характеристика и время прихода максимума), зафиксированная в режимном пункте Кегеты в апреле 2017 г., соотношенная с энергетическим классом землетрясений $K>8$ по сетям KNET и KRNET. Синими прямоугольниками выделены области «срабатывания» двух или трех индикаторов.

Fig. 3. Temporal dynamics of average daily indicators of a seismic event (confidence interval for the mean, voltage-time characteristic and maximum arrival time), recorded at the Kегety intermediates site in April 2017 and related to earthquake energy class $K>8$ over the KNET and KRNET. Blue rectangles indicate the areas of response of two or three indicators.

2. Наблюдаемые 18 и 20 апреля на всех трех рядах синхронизированные во времени аномалии времени прихода максимума, вольт-временной характеристики и среднего доверительного интервала устойчивой формы могут предположительно рассматриваться в качестве предвестников Кегетинского роя землетрясений. Особенно ярко предложенные индикаторы сейсмической активности реагируют на готовящееся 21 апреля 2017 г. землетрясение класса 11.67.

Также были построены индикаторы выявления сейсмического события для ближайшего к пункту Кегеты пункта Иссык-Ата (рис. 4).

На пункте Иссык-Ата индикаторы не реагируют на подготовку Кегетинского землетрясения, что может быть связано с большим (15 км) расстоянием от эпицентра события и иным геологическим строением разреза вблизи пункта Иссык-Ата.

При анализе индикаторов для временных рядов 2017 и 2022 гг. наблюдаются их максимумы, не соответствующие произошедшим землетрясениям, что может быть связано с влиянием гроз и магнитных бурь в день наблюдения и влиянием землетрясений с энергетическим классом менее 6, произошедших на расстоянии менее 10 км от пункта наблюдения.

Использование помимо каталога сейсмических событий по сети KNET (НС РАН) каталога сейсмических событий по сети KRNET (Институт сейсмологии НАН КР) позволит зафиксировать землетрясения с энергетическим классом менее 6, произошедших вблизи пункта наблюдения, что демонстрируют данные за январь 2017 г. (рис. 5). Так, наблюдается аномалия двух индикаторов выявления сейсмического события, а именно среднего доверительного интервала и вольт-временной характеристики 4 января, связанная с подготовкой

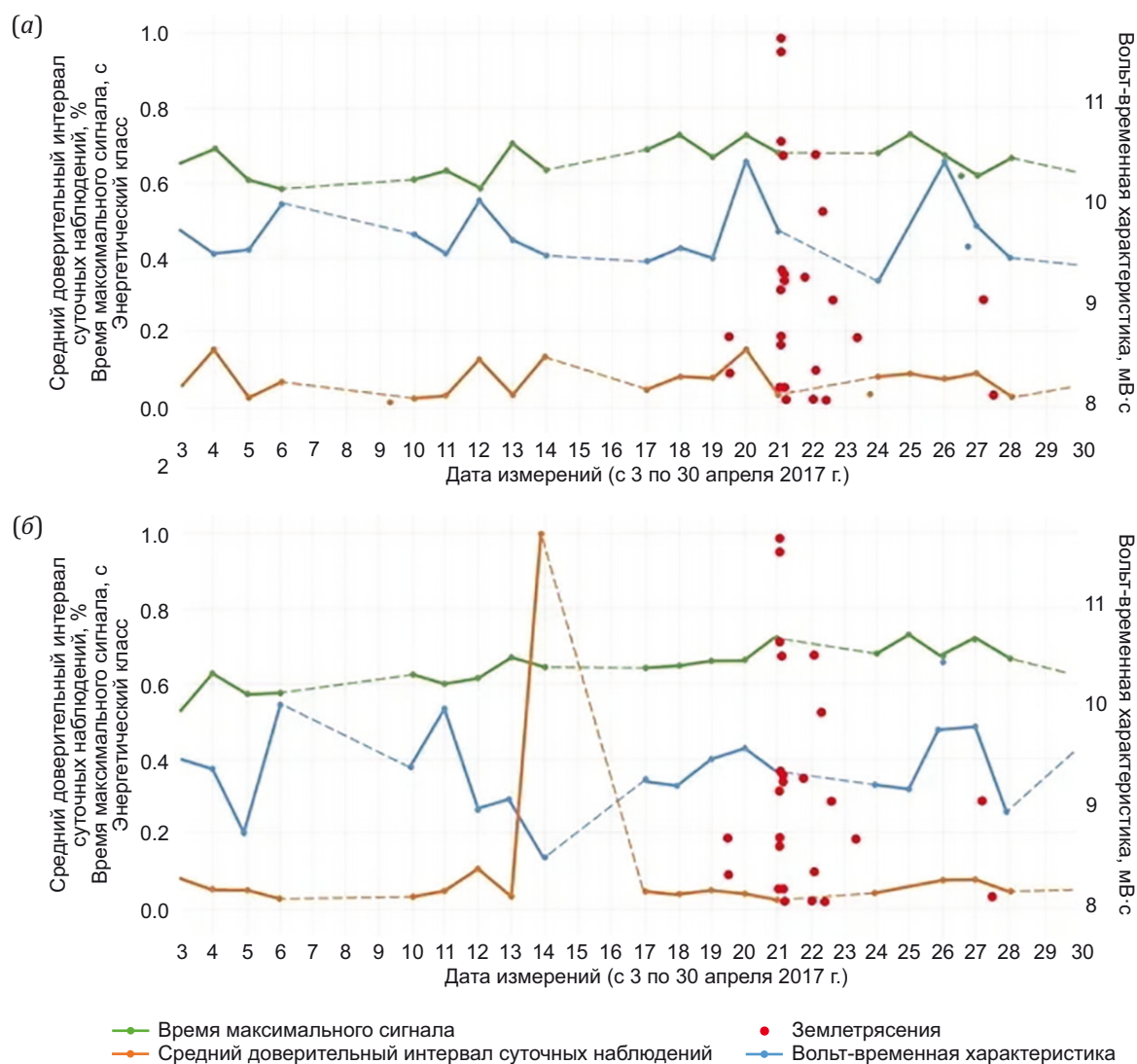


Рис. 4. Временная динамика среднесуточных индикаторов сейсмического события, зафиксированная в режимном пункте Кегеты (а) и пункте Иссык-Ата (б) в апреле 2017 г., соотнесенная с энергетическим классом землетрясений $K > 8$ по сетям KNET и KRNET.

Fig. 4. Temporal dynamics of average daily indicators of a seismic event, recorded at the Kегety intermediates site (a) and at the Issyk-Ata site (b) in April 2017 and related to earthquake energy class $K > 8$ over the KNET and KRNET.



Рис. 5. Временная динамика среднесуточных индикаторов сейсмического события, зафиксированная в режимном пункте в январе 2017 г., соотношенная с энергетическим классом землетрясений по сетям KNET и KRNET.

Fig. 5. Temporal dynamics of average daily indicators of a seismic event, recorded at the intermediates site in January 2017 and related to earthquake energy class over the KNET and KRNET.

землетрясения с энергетическим классом 5, произошедшего 5 января. В связи с тем, что сейсмологическая сеть KNET расположена внутри территории БГП (41.5–43.5° с.ш. и 73–77° в.д.), при решении задач на основе каталога KNET целесообразно ограничиваться этой территорией. В этом случае KNET позволяет в полном объеме регистрировать события с $K \geq 6.7$ [Sycheva, 2022]. Однако при удалении от границ БГП количество зарегистрированных слабых землетрясений уменьшается, вследствие чего для регистрации сейсмических событий за пределами БГП требуется привлечение более расширенного каталога, каким является каталог KRNET [Abdrakhmatov et al., 2014]. Здесь необходимо отметить, что каталог KRNET представлен сейсмическими событиями, зарегистрированными как сейсмическими станциями ИС НАН КР, так и сетью KNET, общее количество которых в настоящее составляет 27. В целом, для большинства станций сети KRNET, кроме установленных на осадочных породах в больших городах (Бишкек, Ош, Баткен), характерен низкий уровень шумов, близкий к нижеуровневой модели Петерсона [Abdrakhmatov et al., 2014].

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Построим оценку параметров сейсмических событий, фиксируемых системой электромагнитного мониторинга на БГП. Аналогичный подход без формализации понятия индикаторов ранее применялся для Байкальской рифтовой зоны [Dashevsky, Martynov, 2002]. Для анализа выбран 2017 г., так как в апреле этого года произошло сильное сейсмическое событие вблизи од-

ного из пунктов мониторинга (Кегетинское землетрясение), и 2022 г., чтобы проверить предположения об индикаторах выявления события на современных данных. Для БГП на рис. 6 в координатах «энергетический класс – эпицентральный расстояние» нанесены все сейсмические события классом более 8 по сетям KNET и KRNET, произошедшие в 2017 и 2022 гг. Разным цветом отмечены события, зафиксированные системой мониторинга по одному, двум и трем индикаторам их выявления.

На рис. 6 красным цветом выделены события, на которые реагируют три индикатора (вольт-временная характеристика, средний доверительный интервал и время прихода максимума сигнала), зеленым – на которые реагируют два индикатора (вольт-временная характеристика и средний доверительный интервал), а желтым – на которые реагирует один индикатор (вольт-временная характеристика или средний доверительный интервал).

Выделяются две группы событий. Первая группа связана с Кегетинским роем с расстоянием до 10 км от эпицентра до пункта Кегеты. Вторая – остальные события с эпицентрального расстоянием от 10 до 100 км и более.

Из приведенных на рис. 7 данных можно установить, какого класса и с каким эпицентрального расстоянием события будут фиксироваться системой мониторинга по двум или трем индикаторам выявления сейсмического события. Эти уравнения линии тренда справедливы для конкретных геологических условий БГП и данной системы возбуждения – регистрации.

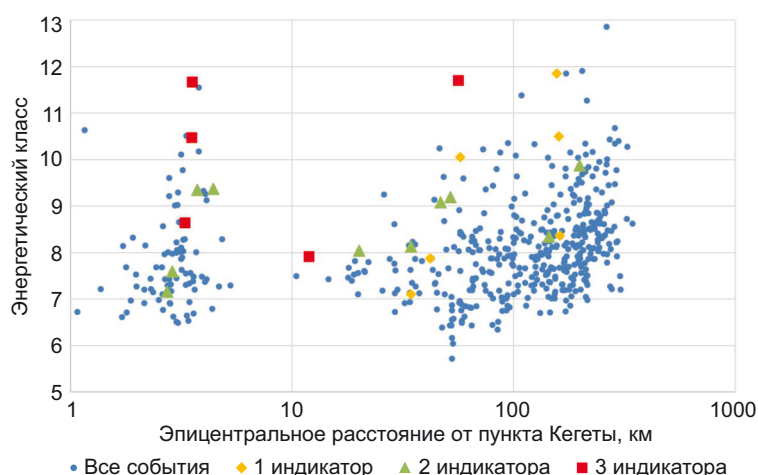


Рис. 6. Все сейсмические события с энергетическим классом более 8 по данным сетей KNET и KRNET за 2017 г.

Fig. 6. All seismic events with energy class $K > 8$ from the KNET and KRNET data for 2017.

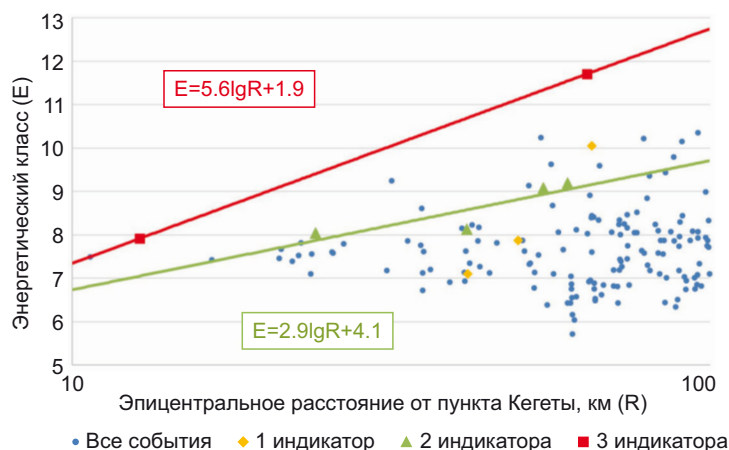


Рис. 7. Все сейсмические события с энергетическим классом более 8 по данным сетей KNET и KRNET за 2017 г. с эпицентральной расстоянием от пункта Кегеты от 10 до 100 км. Построены линии тренда для двух и трех индикаторов, приведены уравнения линейной регрессии, построенные по методу наименьших квадратов.

Fig. 7. All seismic events with energy class $K > 8$ from the KNET and KRNET data for 2017, 10–100 km epicentral distance to the Kegety site. Trend lines drawn for 2 and 3 indicators, and least squares linear regression equations.

Чем больше эпицентральной расстояние, тем больше энергетического класса должно быть землетрясение, чтобы его могла зафиксировать система мониторинга по предложенным индикаторам.

Подобные выражения для модели полупространства с включением для определения асимптотического выражения для главных деформаций на окружности с центром в эпицентре включения были представлены в работах [Dobrovolsky, 1984, 2010]. Определяемую И.П. Добровольским величину деформации можно выразить через энергетический класс или магнитуду сейсмического события:

$$\varepsilon = \frac{31\alpha V\tau}{16\pi\mu r^3}, \quad (2)$$

где $\varepsilon = \max(\text{mod}(\varepsilon_1), \text{mod}(\varepsilon_2))$; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – главные деформации; V – объем очага (км^3); α – относительное изменение модуля сдвига ($\alpha=0.1$); τ – разрушающее напряжение

для кристаллической породы ($\tau=10^8$ Па); μ – модуль сдвига ($\mu=2 \cdot 10^{10}$ Па).

На рис. 8 зеленым цветом выделены сейсмические события, на которые реагируют два индикатора (вольт-временная характеристика и средний доверительный интервал), желтым – на которые реагирует один индикатор (вольт-временная характеристика или средний доверительный интервал).

Особенностью сейсмического режима 2022 г. в отличие от 2017 является отсутствие очень сильных событий, на которые бы реагировали все три индикатора. Но в течение этого года произошло больше мелких землетрясений с эпицентральной расстоянием от 10 до 100 км.

Из приведенных на рис. 9 данных можно установить, события какого класса и с каким эпицентральной расстоянием будут фиксироваться системой мониторинга по одному или двум индикаторам выявления

сейсмического события. Эти уравнения линии тренда справедливы для конкретных геологических условий БГП и данной системы наблюдения.

Таким образом может быть оценена чувствительность предложенных индикаторов к событиям, произошедшим на БГП в 2017 и 2022 гг.

В настоящее время авторы совместно с коллегами из НГТУ (г. Новосибирск) занимаются разработкой программного комплекса, позволяющего визуализировать и анализировать данные электромагнитного мониторинга по всем пунктам наблюдения на БГП за весь период наблюдений [Dyminsky et al., 2024]. Цифровая платформа будет предназначена для комплексного анализа данных электромагнитного мониторинга кажущегося электрического сопротивления геосреды совместно с данными, получаемыми из сейсмологических сетей KNET и KRNET, с целью последующего выявления аномалий и трендов на различ-

ных по физической природе временных рядах, которые могут быть интерпретированы как индикаторы землетрясений.

Данные мониторинга, поступающие в платформу с БГП и из сейсмологических сетей KNET и KRNET, располагаются в файловом хранилище, представленном в виде реляционной, масштабируемой базы данных. Серверная часть платформы предоставляет доступ к данным двумя способами – либо с помощью инструментов объектно-реляционного отображения базы данных, либо путем отправки SQL-запросов к файловому хранилищу.

Клиентская и серверная части платформы разработаны на языке программирования Python, на сегодняшний день являющемся стандартом в задачах обработки и анализа данных. Клиентская часть реализована с помощью фреймворка Streamlit, предоставляющего широкий спектр инструментов для создания



Рис. 8. Все сейсмические события с энергетическим классом более 8 по данным сетей KNET и KRNET за 2022 г.

Fig. 8. All seismic events with energy class $K > 8$ from the KNET and KRNET data for 2022.

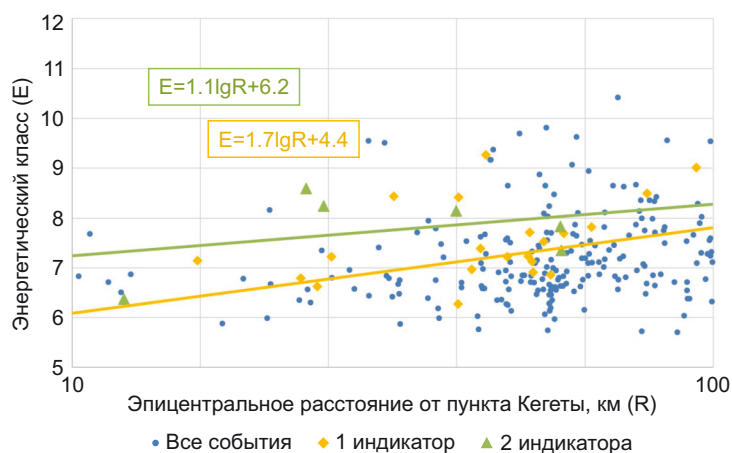


Рис. 9. Все сейсмические события с энергетическим классом более 8 по данным сетей KNET и KRNET за 2022 г. с эпицентральной дистанцией от 10 до 100 км. Построены линии тренда для одного и двух индикаторов, приведены уравнения линейной регрессии, построенные по методу наименьших квадратов.

Fig. 9. All seismic events with energy class $K > 8$ from the KNET and KRNET data for 2022, 10–100 km epicentral distance. Trend lines drawn for 1 and 2 indicators, and least squares linear regression equations.



Рис. 10. Структура программного комплекса для визуализации и анализа данных электромагнитного мониторинга на БГП.

Fig. 10. The structure of the software system for visualization and analysis of the electromagnetic monitoring data on the BGT area.

интерактивных панелей визуализации данных. Серверная часть выполнена с помощью веб-фреймворка Fast API. Данный выбор обусловлен быстродействием данного решения и его простотой, обеспечивающей высокую скорость разработки.

Платформа, структура которой представлена на рис. 10, поддерживает два основных сценария работы – взаимодействие с пользователем и взаимодействие с вычислительной средой. Первый сценарий предоставляет пользователю возможность управлять функциональными задачами платформы через веб-браузер путем выбора пунктов мониторинга, интервалов времени наблюдения и магнитуды сейсмических событий, видов отображаемых индикаторов, а также методов обработки и анализа данных.

Помимо функционала для работы с данными электромагнитного мониторинга, платформа предоставляет сервис для моделирования и визуализации на единой временной сетке различных индикаторов предполагаемого сейсмического события и самих событий для совместного анализа.

Сценарий взаимодействия с вычислительной средой обеспечивает возможность доступа к файловому хранилищу и необходимым методам серверной стороны в фоновом режиме без непосредственного участия пользователя для обеспечения возможности интеграции в платформу нейросетевых моделей для прогнозирования сейсмической активности и автоматизации оценки индикаторов сейсмического события [Dyminsky et al., 2024].

В связи с большим объемом разнородных данных очевидна необходимость в разработке платформы для проведения анализа индикаторов для прогнозирования сейсмической активности и машинного обучения с использованием возможностей искусственного интеллекта.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследуется проблема прогнозирования сейсмических событий на территории БГП, описана используемая на полигоне система мониторинга методом становления электромагнитного поля.

Предложены три физически связанные с распределением электромагнитного поля индикатора сейсмического события – вольт-временная характеристика, время прихода максимума сигнала и средний доверительный интервал.

Зафиксированы аномалии всех трех индикаторов перед сейсмическим событием, зарегистрированным в апреле 2017 г. вблизи пункта Кегеты. Оценена чувствительность предложенных индикаторов к событиям, произошедшим на БГП в 2017 и 2022 гг.

В настоящее время разрабатывается программная платформа, позволяющая визуализировать, анализировать данные электромагнитного мониторинга по всем пунктам наблюдения на БГП, проводить машинное обучение, автоматически строить и оценивать индикаторы для прогнозирования сейсмической активности.

После завершения разработки программного продукта будет предложена технология прогнозирования приближающегося сейсмического события на территории БГП, основанная на использовании всей сети измерительных станций, выполняющих мониторинг нестационарного электрического поля заземленной электрической линии.

Перечислим основные элементы предлагаемой технологии. Для каждой из станций вычисляют среднесуточные значения трех индикаторов: времени прихода максимума среднесуточного сигнала в пункт измерения, вольт-временной характеристики среднесуточного импульса, среднего доверительного интервала суточных наблюдений. На основе среднесуточных значений

каждого из индикаторов строят временные ряды и проводят для всей совокупности имеющихся станций одиночный и групповой сравнительный анализ временной динамики значений индикаторов с целью выявления синхронизированных по времени аномалий устойчивой формы, которые рассматривают как единую трехкомпонентную сигнатуру геологического вещества, реагирующего на подготовку сейсмотектонического события, на основе чего делают вывод о его приближении.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Научной станции РАН в г. Бишкеке (Кыргызстан) за предоставленные экспериментальные данные и участие в постановке задач и обсуждении результатов, сотрудникам лаборатории искусственного интеллекта ИВМиМГ СО РАН (г. Новосибирск) к.т.н. А.А. Якименко, магистрантам НГТУ (г. Новосибирск) И.И. Дыминскому и И.В. Смоленскому за участие в создании программной платформы для работы с данными геофизического мониторинга, а также Институту сейсмологии НАН КР за возможность использования в работе их сейсмического каталога.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abdrakhmatov K.E., Berezina A.V., Pershina E.V., Mozoleva E.L., 2014. System of Seismic Monitoring of the Territory of Kyrgyz Republic. Bulletin of the Institute of Seismology NAS KR 2 (4), 14–21 (in Russian) [Абдрахматов К.Е., Березина А.В., Першина Е.В., Мозолева Е.Л. Система сейсмического мониторинга территории Кыргызстана // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2014. № 2 (4). С. 14–21].

Barsukov O.M., Sorokin O.N., 1973. Apparent Resistivity Changes of Rocks in the Garm Seismoactive Area. Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth 10, 100–102 (in Russian) [Барсуков О.М., Сорокин О.Н. Изменение кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе // Известия АН СССР. Физика Земли. 1973. № 10. С. 100–102].

Barsukov P., Fainberg E., 2019. New Interpretation of the Reduction Phenomenon in the Electrical Resistivity of

Rock Masses Before Local Earthquakes. Physics of the Earth and Planetary Interiors 294, 106279. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.106279>.

Bataleva E.A., Mukhamadeeva V.A., 2018. Complex Electromagnetic Monitoring of Geodynamic Processes in the Northern Tien Shan (Bishkek Geodynamic Test Area). Geodynamics & Tectonophysics 9 (2), 461–487 (in Russian) [Баталева Е.А., Мухамадеева В.А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 2. С. 461–487]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356>.

Bogomolov L.M., 2012. Response of the Emission Signals to the Effects of Electromagnetic Fields and Vibrations Inside the Geologic Media. PhD Thesis (Dr. Sc. Phys.-Math.). Moscow, 359 p. (in Russian) [Богомолов Л.М. Отклики эмиссионных сигналов геосреды на воздействия электромагнитных полей и вибраций: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М., 2012. 359 с.].

Bogomolov L.M., Sycheva N.A., 2022. Earthquake Predictions in XXI Century: Prehistory and Concepts, Precursors and Problems. Geosystems of Transition Zones 6 (3), 145–164 (in Russian) [Богомолов Л.М., Сычева Н.А. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы // Геосистемы переходных зон. 2022. Т. 6. № 3. С. 145–164]. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.3.145-164.164-182>.

Bragin V.D., Sverdlik L.G., 2020. Estimates of Relationship Between the Dynamics of Geophysical Parameters and the Stress-Strain State of Geoenvironment. Geodynamics & Tectonophysics 11 (2), 352–364 (in Russian) [Брагин В.Д., Свердлик Л.Г. Оценки взаимосвязи динамики геофизических параметров с напряженно-деформированным состоянием исследуемых объектов геосреды // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 2. С. 352–364]. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0479>.

Cortés-Arroyo O.J., Romo-Jones J.M., Gómez-Treviñ E., 2018. Robust Estimation of Temporal Resistivity Variations: Changes from the 2010 Mexicali, M_w 7.2 Earthquake and First Results of Continuous Monitoring. Geothermics 72, 288–300. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.11.012>.

Dashevsky Yu.A., Martynov A.A., 2002. Inverse Problem of Electrical Sounding in Seismoactive Areas. Study Guide. Novosibirsk State University, Novosibirsk, 52 p. (in Russian) [Дашевский Ю.А., Мартынов А.А. Обратные задачи электрических зондирований в сейсмоактивных районах: Учебно-методическое пособие. Новосибирск: НГУ, 2002. 52 с.].

Dobrovolsky I.P., 1984. The Mechanism of the Tectonic Earthquake Generation Process. Institute of Physics of the Earth of the USSR Academy of Science, Moscow, 189 p. (in Russian) [Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1984. 189 с.].

Dobrovolsky I.P., 2004. The Mathematical Theory of Generation and Prediction of a Tectonic Earthquake. Fizmatlit,

Moscow, 204 p. (in Russian) [Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2004. 204 с.].

Dobrovolsky I.P., 2010. On the Tectonic Earthquake Prediction. *Geophysical Research* 11 (1), 35–46 (in Russian) [Добровольский И.П. О проблеме прогноза тектонического землетрясения // Геофизические исследования. 2010. Т. 11. № 1. С. 35–46].

Dyminsky I.I., Smolensky I.V., Imashev S.A., Evmenova D.M., 2024. Digital Platform for Analyzing Geoelectromagnetic Monitoring Data. In: *The Geospatial Ecosystem as a Basis for Digital Transformation of the Society. Proceedings of the XX International Scientific Congress Interexpo GEO-Siberia-24* (May 15–17, 2024). Vol. 6. SSUGT, Novosibirsk, p. 56–61 (in Russian) [Дыминский И.И., Смоленский И.В., Имашев С.А., Евменова Д.М. Цифровая платформа для анализа данных геоэлектромагнитного мониторинга // Геопространственная экосистема как основа цифровой трансформации общества: Материалы XX Международного научного конгресса Интерэкспо ГЕО-Сибирь-24 (15–17 мая 2024 г.). Новосибирск: СГУГиТ, 2024. Т. 6. С. 56–61]. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2024-6-56-61>.

Gordeev V.F., Zadergilova M.M., Konovalov Yu.F., Malyshev S.Yu., Biltayev S.Kh.D., 2018. Monitoring Method for Predicting Seismic Danger. A Patent on Invention № RU 2672785 C1 of July 03, 2018. *ROSPATENT*, Moscow (in Russian) [Гордеев В.Ф., Задегиллова М.М., Коновалов Ю.Ф., Малышков С.Ю., Бильтаев С.Х.Д. Способ мониторинга для прогнозирования сейсмической опасности: Патент на изобретение № RU 2672785 C1 от 03.07.2018. М.: РОСПАТЕНТ, 2018].

Knyazev B.A., Cherkassky V.S., 1996. Introduction to the Experimental Data Processing. *Electronic Textbook and Data Processing Program for the Beginners. Study Guide*. Novosibirsk State University, Novosibirsk, 93 p. (in Russian) [Князев Б.А., Черкасский В.С. Начала обработки экспериментальных данных. Электронный учебник и программа обработки данных для начинающих: Учебное пособие. Новосибирск: НГУ, 1996. 93 с.].

Kozlova I.A., Biryulin S.V., Yurkov A.K., Demezhko D.Yu., 2021. Volume Radon Activity Changes and Thermal Variations in the Well During Earthquake Preparation. *Geocology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology* 6, 37–46 (in Russian) [Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К., Демезко Д.Ю. Изменение объемной активности почвенного радона и температурные вариации в скважине во время процесса подготовки землетрясения // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2021. № 6. С. 37–46]. <https://doi.org/10.31857/S0869780921060059>.

Li M., Jianmin Ch., Qifi Ch., Guiping L., 1995. Features of Precursor Fields Before and After the Datong-Yanggao Earthquake Swarm. *Journal of Earthquake Prediction Research* 4 (1), 1–30.

Mori T., Ozima M., Takayama T., 1993. Real Time Detection of Anomalous Geoelectric Changes. *Physics of the Earth*

and Planetary Interiors 77 (1–2), 1–12. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(93\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0031-9201(93)90029-9).

Park S.K., 2002. Perspectives on Monitoring Resistivity Changes with Telluric Signals at Parkfield, California: 1988–1999. *Journal of Geodynamics* 33 (4–5), 379–399. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00003-0](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00003-0).

Park S.K., Fitterman D.V., 1990. Sensitivity of the Telluric Monitoring Array in Parkfield, California to Changes of Resistivity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 95 (B10), 1557–15571.

Park S.K., Larsen J.C., Lee T.-Ch., 2007. Electrical Resistivity Changes Not Observed with the 28 September 2004 M6.0 Parkfield Earthquake on the San Andreas Fault, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112 (B12), B12305. <https://doi.org/10.1029/2006JB004459>.

Petrova N.V., Kurova A.D., 2023. Comparison of Earthquake Classification Systems in Local Magnitudes ML in Some Regions of Northern Eurasia. *Russian Journal of Seismology* 5 (2), 61–76 (in Russian) [Петрова Н.В., Курова А.Д. Сопоставление систем классификации землетрясений в локальных магнитудах ML в некоторых регионах Северной Евразии // Российский сейсмологический журнал. 2023. Т. 5. № 2. С. 61–76]. DOI:10.35540/2686-7907.2023.2.05.

Seminsky I.K., Pospeev A.V., 2022. Reflection of Strong 2020–2021 Baikal Rift Earthquakes in the Earth's Magnetotelluric Field Observation Data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 58, 484–492. <https://doi.org/10.1134/S1069351322040097>.

Sverdlik L.G., 2019. Short-Period Variations of Specific Electric Resistance of Earth Crust. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University* 19 (4), 143–149 (in Russian) [Свердлик Л.Г. Короткопериодные вариации удельного электрического сопротивления земной коры // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2019. Т. 19. № 4. С. 143–149].

Sycheva N.A., 2022. Some Characteristics of the Earthquake Catalog and the Seismic Process According to the KNET Network. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (3), 0640 (in Russian) [Сычева Н.А. Некоторые характеристики каталога землетрясений и сейсмического процесса по данным сети KNET // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 3. 0640]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-3-0640>.

Varotsos P., Alexopoulos K., Lazaridou-Varotsou M., Nageo T., 1993. Earthquake Predictions Issued in Greece by Seismic Electric Signals Since February 6, 1990. *Tectonophysics* 224 (1–3), 269–288. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90080-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90080-4).

Volikhin A.M., Bragin V.D., Zubovich A.V., Koshkin N.A., Trapeznikov Yu.A., 1993. The Manifestation of Geodynamic Processes in Geophysical Fields. *Nauka*, Moscow, 158 p. (in Russian) [Волыхин А.М., Брагин В.Д., Зубович А.В., Кошкин Н.А., Трапезников Ю.А. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. М.: Наука, 1993. 158 с.].