

Э. Н. Шорина^{1,2✉}, Д. М. Евменова², И. Н. Ельцов^{2,3}, С. А. Имашев⁴, А. А. Якименко³

Разработка программного инструментария для анализа индикаторов землетрясений по данным электромагнитного мониторинга на Бишкекском геодинамическом полигоне

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

⁴Научная станция РАН, г. Бишкек, Киргизская Республика
e-mail: e.shorina@g.nsu.ru

Аннотация. В работе предложен и протестирован метод анализа индикаторов сейсмической активности, который основывается на анализе электромагнитного мониторинга, выполненного на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП) Научной станцией РАН в г. Бишкек, Киргизская Республика. Предлагаемый метод учитывает геоэлектрическое состояние среды на разных глубинах и дает возможность выявлять зоны, имеющие повышенную чувствительность к геодинамическим процессам. В работе были использованы данные зондирования, полученные методом становления электромагнитного поля на БГП за 2017 и 2022 годы. Выделены нормальные и аномальные сигналы, а также рассмотрены причины, из-за которых появляются отклонения на графиках мониторинга: сейсмическая и грозовая активность и воздействие магнитных бурь. На основе анализа исходных данных разработан автоматизированный расчет индикаторов сейсмического события для всех пунктов. Результаты данных расчетов, представленные в виде дополнительного блока «Платформы для работы с данными электромагнитного зондирования и сейсмологии – ПЛЭС».

Ключевые слова: Бишкекский геодинамический полигон, электромагнитный мониторинг, индикаторы, прогноз землетрясений, землетрясение, становление поля, автоматизированный подсчет, цифровая платформа

E. N. Shorina^{1,2✉}, D. M. Evmenova², I.N. Yeltsov^{2,3}, S. A. Imashev⁴, A. A. Yakimenko³

Development of software tools for analyzing earthquake indicators based on electromagnetic monitoring data at the Bishkek geodynamic polygon

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

⁴Research station of the RAS, Bishkek, Kyrgyz Republic
e-mail: e.shorina@g.nsu.ru

Abstract. The paper proposes and tests a method for analyzing indicators of seismic activity, which is based on the analysis of electromagnetic monitoring performed on the territory of the Bishkek Geodynamic Polygon (BGP) by the Scientific Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Kyrgyz Republic. The proposed method takes into account the geoelectric state of the medium at different depths and makes it possible to identify zones with increased sensitivity to geodynamic

processes. The work used sounding data obtained by the method of electromagnetic field formation at the BGP for 2017 and 2022. Normal and anomaly signals are highlighted, and the causes of deviations in monitoring schedules are considered: seismic and thunderstorm activity and the effects of magnetic storms. Based on the analysis of the initial data, an automated calculation of seismic event indicators for all points has been developed. The results of these calculations are presented in the form of an additional block "Multi-user platform for processing and analyzing electromagnetic soundings and seismological observations – PLES".

Keywords: Bishkek geodynamic polygon, electromagnetic monitoring, indicators, earthquake prediction, earthquake, transient electromagnetic method, automated calculation, digital platform

Введение

Землетрясения остаются одной из серьезных угроз для населения Земли, вследствие чего требуется совершенствование методов анализа данных мониторинга сейсмических событий [1]. Эти данные получают на специальных прогностических полигонах, располагающихся в сейсмоактивных областях. Полигоны созданы для того, чтобы выявить взаимосвязи изменений параметров среды для выявления сейсмической активности и прогнозирования землетрясений. Геофизиками обрабатываются геофизические, в частности, электромагнитные, данные с пунктов наблюдения Бишкекского геодинамического полигона (БГП). БГП – экспериментальный полигон, располагающийся на научной станции РАН неподалеку от г. Бишкек в одной из сейсмоактивных областей Северного Тянь-Шаня. Данные, получаемые с БГП, содержат огромное количество информации, требующие внедрения автоматизированных цифровых решений.

Отклонения в электромагнитных откликах сейсмогенной среды, которые фиксируются на пунктах наблюдения БГП могут быть вызваны как с повышенным трещинообразованием при подготовке землетрясения, так и внешними факторами, такими как грозы и магнитные бури [2]. Многообразие причин отклонений усложняет анализ и требует специализированных инструментов для быстрого выделения ключевых индикаторов сейсмической активности.

Измерения на БГП ведутся более 40 лет, накоплено огромное количество данных. Ручная обработка является трудоёмким и ресурсозатратным процессом, поэтому в ИВМиМГ СО РАН ведется разработка цифровой платформы для автоматического построения индикаторов ожидаемых сейсмических событий [3]. На сегодняшний день одной из актуальных задач является создание программного блока, который будет вести автоматизированный расчёт индикаторов сейсмического события по данным электромагнитного мониторинга геологической среды.

Методы и материалы

Бишкекский геодинамический полигон (БГП), лежит в пределах центрального сегмента Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенерирующей зоны и представляет собой прогностический полигон [1].

БГП характеризуется активной сейсмичностью, вызванной современными деформациями. На его территории работает сейсмологическая сеть KNET, регистрирующая локальную и региональную сейсмичность.

На БГП располагаются стационарные пункты наблюдения, в которых проводят и собирают данные электромагнитного мониторинга: Кегеты, Иссык-Ата, Таш-Башат, Чункурчак, Шавай и Ак-Суу. Сбор информации на этих пунктах осуществляется ежедневно, кроме выходных и праздничных дней, по несколько сеансов в день.

Для выявления связи между данными электромагнитного мониторинга и сейсмическими событиями предложено использовать индикаторы ожидаемого сейсмического события [4, 5]:

1) Время прихода максимального значения сигнала (ВПМ) – максимальное значение кажущегося сопротивления в полученных данных в течении суток максимальная точка на графике кривой становления поля;

2) Вольт-временная характеристика (ВВХ) – это площадь под графиком, которая представляет собой зависимость от электрического сопротивления;

3) Средний доверительный интервал (СДИ), который характеризует отклонение в электромагнитных данных от нормы в сутки в рамках определенных значений.

Данные электромагнитного мониторинга и индикаторов регистрируются и доступны на «Многопользовательской платформе для обработки и анализа электромагнитных зондирований и сейсмологических наблюдений – ПЛЭС» [6]. С помощью платформы можно анализировать данные за любой период/дату, пункт наблюдения, каталог данных, энергетический класс и индикаторы сейсмической активности.

Для дальнейшего развития и улучшения работы с данными был разработан дополнительный блок с реакцией индикаторов на ожидаемое сейсмическое событие.

Для реализации этого блока были взяты данные индикаторов сейсмического события и для дальнейшего подсчета количества срабатывающих индикаторов бралась разность данных электромагнитного мониторинга последующего из предыдущего дней. Если разность между значениями индикаторов за эти дни различались на 0.2 и более, то считалось, что индикатор «сработал». Тогда в промежуточную таблицу прописывалась 1. Но если значение разницы было меньше 0.2, то ставился 0 и считалось, что индикатор «не сработал», а 0.2 было получено эмпирическим путем. Далее «сработал» (1) и «не сработал» (0) всех индикаторов (ВПМ, ВВХ и СДИ) суммировались, и в таблицу выводилось суммарное количество индикаторов.

При анализе таблицы можно увидеть, что чаще всего срабатывал один индикатор из трех, а реже всего сразу срабатывали три индикатора. Были такие случаи, когда в один день могли сработать индикаторы сразу на всех пунктах и наоборот, срабатывали индикаторы на одном пункте из девяти. Событие имеет

глобальный характер, если индикаторы срабатывают на двух или более пунктах одновременно, и локальный, если только на одном.

Результаты

Построены кривые становления электромагнитного поля за 2017 год. Данные за этот год рассматриваются, так как в нем было крупное событие – Кегетинское землетрясение и много других событий. Под нормальными кривыми имеются в виду те кривые становления электромагнитного поля, которые имеют типичную форму для данного сигнала, где не наблюдается резких изменений и расхождения сигналов, измеренных в разное время суток более, чем на 2 Ом·м. Аномальные кривые характеризуются существенными отклонениями формы сигнала от формы нормальных кривых.

Отклонения на аномальных графиках электромагнитных данных могут возникать из-за сейсмических событий, гроз, геомагнитной активности или неполадок измерительной техники.

Магнитные бури способны как маскировать, так и усиливать отклонения иного происхождения. Грозы, особенно в дождливые периоды, также приводят к искажению результатов измерений.

Наиболее важной причиной вариаций является сейсмическая активность. Это можно увидеть в данных от 21 апреля 2017 года, когда в 4 км от пункта Кегеты произошло сильное землетрясение (энергетический класс (К)>8).

Геомагнитная активность (магнитные бури) является ещё одним фактором появления аномалий. Её уровень оценивают по индексу A_p и чем сильнее активность, тем он выше. Геомагнитная активность чаще наблюдается зимой, весной и осенью, тогда как грозы влияют на электромагнитный мониторинг преимущественно летом.

Дополнительный модуль нужен для обработки электромагнитных данных, поступающих со станций наблюдения. Главная задача состоит в корректном выводе о срабатывании индикаторов.

Первый этап – загрузка и настройка параметров: импорт библиотек и данных.

Второй этап – сбор и преобразование дат. Проверяется каждый Excel-файл на его наличие, затем он читается и полученные даты из файла отправляются в набор с датами `datetime`. Формируется список всех пунктов и указываются три рассчитываемых параметра (ВВХ, ВПМ, СДИ). Задается пороговое значение 0.2 (значение подобрано эмпирически) для оценки изменений показаний.

Третий этап – обработка данных. Программа проходит по всем данным и выполняет последовательные действия: сначала вычисляет разницу данных за соседние дни, затем сравнивает эту разницу с пороговым значением (если значение 0.2 превышено, то ставится 1, если нет, то 0), и в самом конце считает сумму нулей и единиц для трёх индикаторов. В итоге получается число от 0 до 3, что отражает уровень сейсмической активности.

Четвертый этап – создание таблицы: транспонируются все данные и сохраняются в файл.

Пятый этап – визуализация результата. Обработанные данные сводятся в единую таблицу с цветовой индикацией (рис.1).

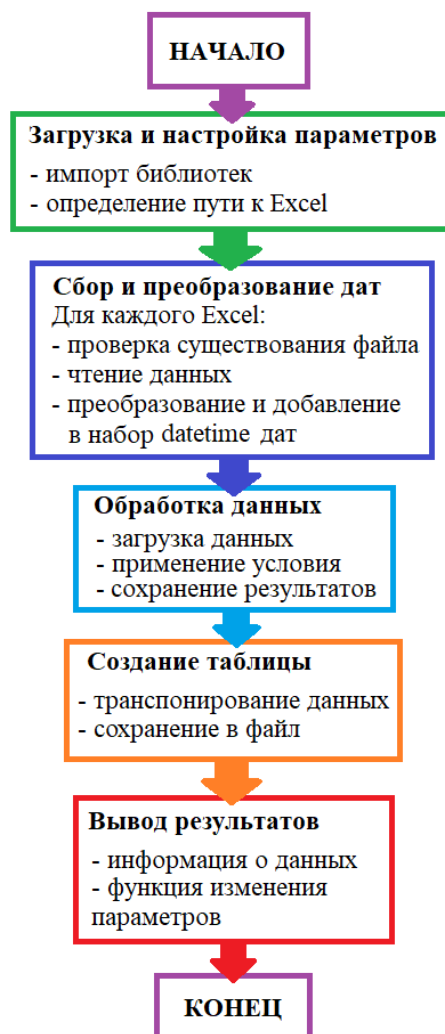


Рис. 1. Блок-схема программного инструментария

Для реализации программного инструментария был использован язык программирования Python. Для реализации вычислительного блока применялись клиент-серверный подход на основе веб-фреймворка Flask [7, 8].

Итоговый внешний вид программного инструментария выглядит следующим образом: блок разницы значения индикатора, блок диапазона дат, блок выбора пунктов, где можно выбрать все или несколько пунктов сети БГП, и блок с выведенными таблицей и графиком (рис. 2).

ИТОГОВАЯ ТАБЛИЦА ДАННЫХ

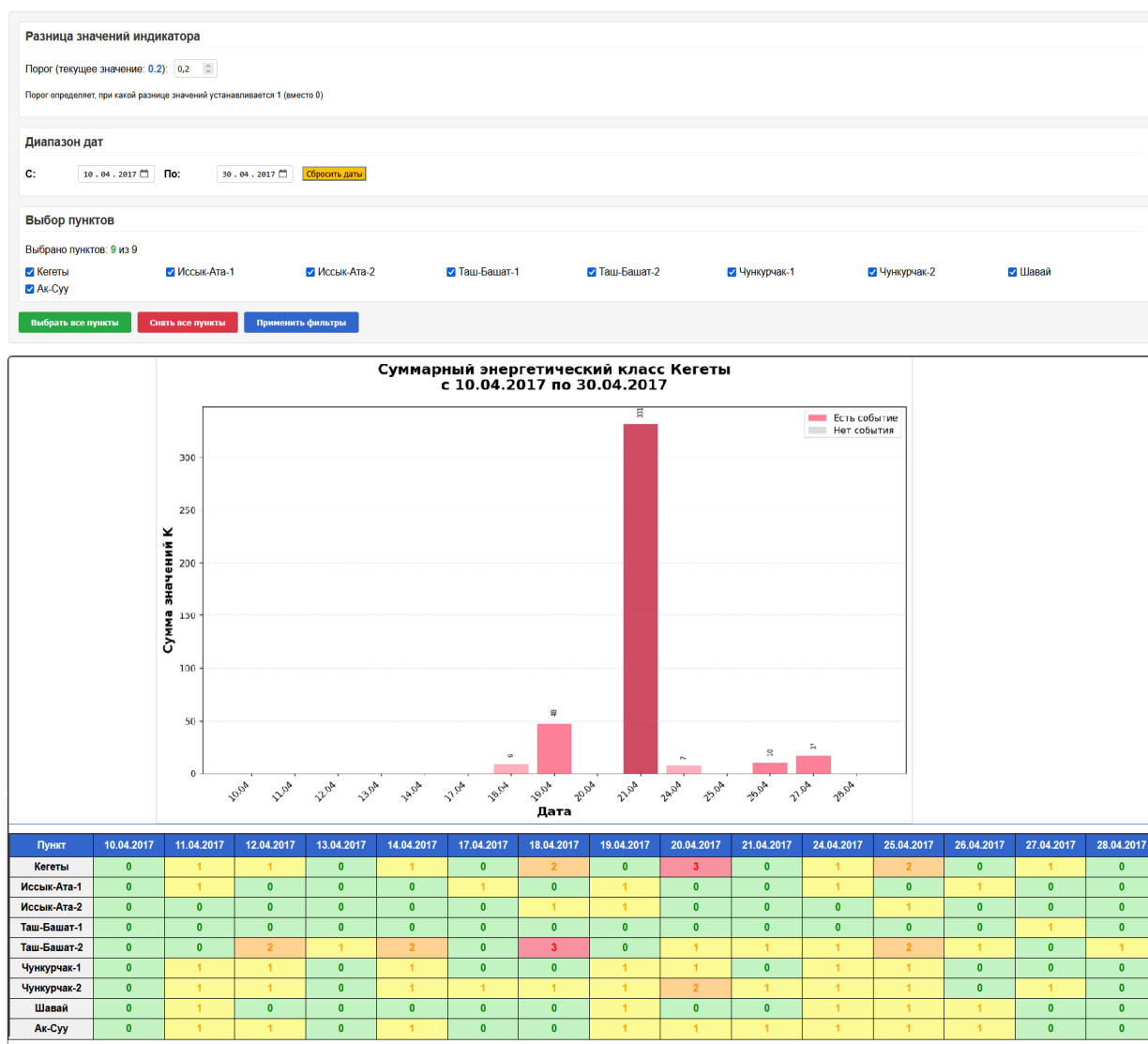


Рис. 2. Внешний вид программного инструментария

Обсуждение

С помощью разработанного инструментария можно выбрать период, пункты и посмотреть число срабатываний индикаторов предполагаемого землетрясения. В апреле данные электромагнитного мониторинга были зафиксированы всего 19 дней на всех точках БГП. Из 171 дня по всем пунктам, 89 дней индикаторы не сработали, 73 – сработал один индикатор, 7 – два индикатора, и 2 дня – три индикатора. Одновременное срабатывание трех индикаторов зафиксировано 20 апреля перед Кегетинским событием, а также 18 апреля на точке Таш-Башат-2, где было локальное умеренное землетрясение.

На ближайшем пункте к Кегеты Иссyk-Ата, индикаторы не сработали, хоть пункт и является ближайшим к эпицентру Кегетинского землетрясения, возможно, из-за удаления на 20 км и особенностей геологического строения разреза.

Анализ данных за 2017 год позволяют выявить причины отклонений на аномальных графиках: магнитные бури, грозы и сейсмическая активность. Таблица показывает закономерность: чаще всего проявляется одиночное срабатывание, тогда как тройные – редкие. Например, в январе из 171 дня лишь в 75 была зафиксирована активность, при этом 71 день срабатывал только один индикатор, два – 4 раза, три – ни одного раза.

По полученной таблице можно отличить локальные и глобальные события: если аномалия фиксируется на большинстве пунктов, то она характерна для магнитной бури; если на одном или двух, то это локальное событие. В качестве примера можно привести грозу 14 марта, когда аномальный сигнал поступил с одной точки наблюдений.

Особый интерес и внимание представляют одновременные срабатывания трёх индикаторов. В 2017 году это совпало с сильной сейсмической активностью, например 20 апреля перед Кегетинским толчком энергетическим классом выше 5. Срабатывание трех индикаторов одновременно связано с землетрясениями, двух или одного с другими причинами или мелкими событиями (класс ниже 5).

Так же срабатывание индикаторов в таблице на пункте наблюдения может зависеть от ориентации диполя. Они располагаются в противоположные стороны света, и получается так, что на одной стороне индикаторы сработали, а на другой – нет. Исследования в этой области еще ведутся и будут представлены подробнее в будущем.

Заключение

Были проанализированы данные электромагнитного мониторинга с пункта Кегеты на БГП за 2017 год. Выделены нормальные и аномальные данные электромагнитного мониторинга, рассмотрены причины возникновения аномалий, вычислены значения индикаторов сейсмических событий для всех пунктов наблюдения БГП. Создан программный инструментарий для автоматизированного расчета индикаторов. Он позволяет автоматизировать обработку данных электромагнитного мониторинга, свести рассчитанные показатели в единую таблицу и значительно сократить временные затраты. С его помощью можно выбрать временной период и пункты наблюдения, чтобы посмотреть, как срабатывали индикаторы на пунктах, располагающихся на территории БГП. Можно выделить дни, когда индикаторы срабатывают на большинстве пунктов одновременно, а также локальные события. Разработанный инструментарий повышает оперативность анализа и может быть применен в комплексных системах мониторинга сейсмогенерирующих зон.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективам ИВМиМГ СО РАН в Новосибирске и НС РАН в г. Бишкеке за совместную работу. Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0004. Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции РАН (тема № 1025032800066-3-1.5.1

«Комплексное исследование геофизических полей и неупругих процессов в сейсмо-активных зонах литосферы Северного Тянь-Шаня для мониторинга и прогноза сейсмической активности»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Добровольский И. П. О проблеме прогноза тектонического землетрясения // Геофизические исследования. – 2010– Т. 11. – № 1.– С. 35–46.
3. Дыминский И. И., Смоленский И. В., Имашев С. А., Евменова Д. М. Цифровая платформа для анализа данных геоэлектромагнитного мониторинга: сб. материалов XX междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО–Сибирь–24» // Изд-во СГУГиТ. – 2024.– Т. 6. – С. 56–61.
4. Дашевский Ю. А., Ельцов И. Н., Рыбин А. К. Метод прогнозирования приближающегося сейсмического события на территории Бишкекского прогностического полигона // Свидетельство о государственной регистрации патента на изобретение № 2837367 от 31.03.2025.
5. Евменова Д. М., Дашевский Ю. А., Ельцов И. Н., Рыбин А. К., Имашев С. А. Признаки готовящегося сейсмического события на территории Бишкекского прогностического полигона по данным электромагнитного мониторинга методом становления поля // Геодинамика и тектонофизика. – 2025.– Т. 16. – С. 1–12.
6. Дашевский Ю. А., Евменова Д. М., Дыминский И. И., Смоленский И. В., Имашев С. А., Якименко А. А., Ельцов И. Н., Маринин И. В. Многопользовательская платформа для обработки и анализа электромагнитных зондирований и сейсмологических наблюдений –ПЛЭС: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 202561451 от 24.02.2025.
7. Васильев П. А. Web-программирование на языке Python. Фреймворки Django, Flask // Наука, техника, образование. – 2016. – С. 38–39.
8. Волобуев Н. Г. Сравнение web-фреймворков Python // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. – 2017. – Т. 4. – С. 44–46.

© Э. Н. Шорина, Д. М. Евменова, И. Н. Ельцов, С. А. Имашев, А. А. Якименко, 2026