

Вариации спектрального состава микросейсм как прогнозный параметр сейсмических событий в Байкальской рифтовой системе

*Брагинская Людмила Петровна¹,
Григорюк Андрей Павлович¹,
Ковалевский Валерий Викторович¹,
Добрынина Анна Александровна²*

¹ ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск

² ИЗК СО РАН, г. Иркутск

ITES-2025



VII Всероссийская конференция с международным
участием

**Цифровые технологии будущего — современные решения
в науках о Земле**

г. Владивосток, 22-26 сентября 2025 г.

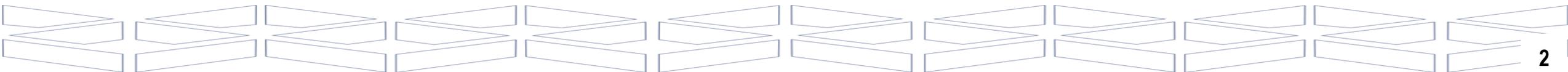
НАУЧНАЯ СЕССИЯ

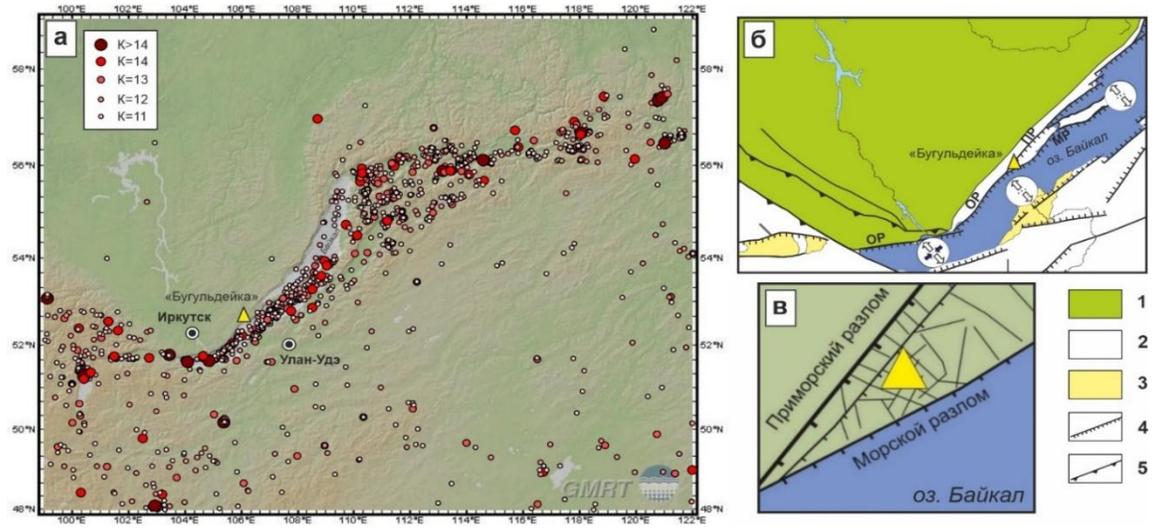
Цифровые технологии в геологии, геофизике,
геохимии

Повышения точности прогнозирования сейсмической активности является критически важным для безопасности населения и инфраструктуры в сейсмоопасных регионах. При этом именно краткосрочный прогноз оказался в фокусе дискуссии о возможности или невозможности предсказания землетрясений по наблюдаемым предвестникам. Однако, судя по обзорным публикациям, пессимизм относительно возможности прогноза крупного тектонического землетрясения, имевший место в научной среде на рубеже XX и XXI вв., сменяется в последние годы более оптимистичным взглядом. [Л. М. Богомолов, Н.А. Сычева. *Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы*].

Для решения многих задач в сейсмологии доминирующими подходами становятся методы МО и интеллектуального анализа данных. В геофизике существенно увеличилось качество и плотность приборов, что привело к резкому росту неструктурированных массивов данных большого объема. Применение передовых технологий позволяет повысить точность прогнозов и улучшить обработку временных рядов данных, что крайне важно для сейсмологической аналитики. МО является мощным инструментом для разведочного анализа данных и поиска закономерностей непосредственно из сейсмических данных. В многочисленных статьях последних лет представлены результаты как обучения с учителем в обработке сейсмических данных, так и применение более сложных моделей с использованием глубоких нейронных сетей. [С. Мостафа Мусави и Грегори К. Бероза. *Машинное обучение в сейсмологии землетрясений*].

В докладе авторы предлагают методику исследования вариаций спектрального состава микросейсм, зарегистрированных в БРС, на основе методов разведочного анализа данных и МО.





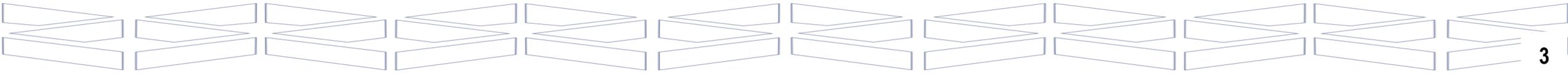
а – сейсмичность БРС с энергетическим классом $K \geq 11$ за период с 1960 по 2024 гг.

б – схема неотектонических структур центральной части БРС

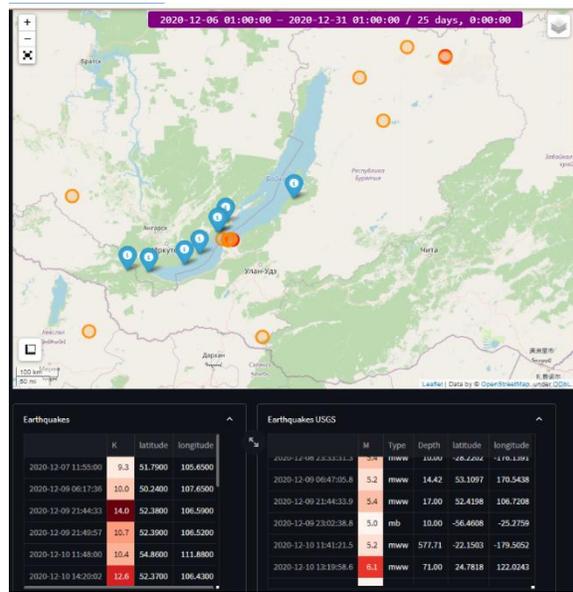
в – положение пункта комплексного мониторинга опасных геологических процессов «Бугульдейка».

- 1 – Сибирская платформа; 2 – Саяно-Байкальская подвижная область; 3 – осадки рифтовых впадин;*
- 4, 5 – разломы: 4 – сбросы, 5 – взбросы*

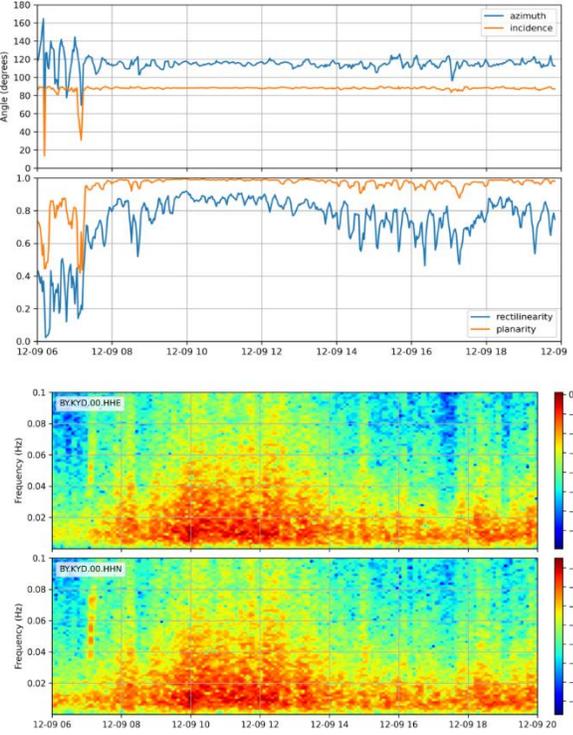
Байкальская рифтовая система расположена в Северной Евразии и является одним из наиболее сейсмически опасных регионов РФ. В тектоническом смысле БРС приурочена к границе двух литосферных плит – стабильной Североевразийской и мобильной Амурской, относительная скорость движения между которыми по данным GPS-геодезии оценивается в 3.4 ± 0.7 мм/год. Основная масса землетрясений БРС сосредоточена в полосе, протягивающейся вдоль оси рифтовых впадин. В год в пределах БРС регистрируется до 10 тыс. землетрясений, большинство из которых относятся к слабым и умеренным. Последние сильные землетрясения произошли в 2020-2021гг. Быстринское землетрясение 21.09.2020г., Mw=5.6 Хубсугульское землетрясение 11.01.2021г., M=6.7, Кударинское землетрясение 09.12.2020 г., Mw=5.6. Цаганское (Mw≈7,5), 12 января 1862 года.



Комплексный геофизический мониторинг БРС



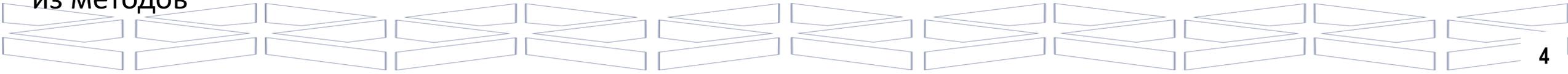
Картографические сервисы ЦП



Анализ данных сейсмического мониторинга

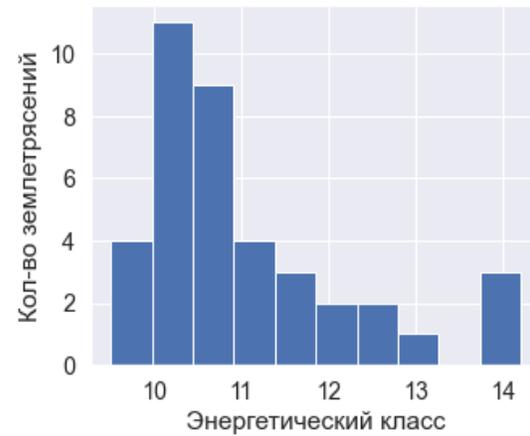
В ИВМиМГ СО РАН разработана Цифровая платформа комплексного мониторинга, позволяющая на одной временной сетке анализировать данные любой станции и любого из методов

ИЗК СО РАН создана пилотная сеть комплексного геофизического мониторинга, состоящая из нескольких полигонов: «Максимиха», «Приольхонье», «Листвянка», «Зун-Мурино». В 2020 году был открыт пункт комплексного мониторинга «Бугульдейка», оснащенный современным геофизическим оборудованием, в том числе – широкополосной сейсмической станцией. Пункт мониторинга расположен вблизи зоны влияния крупнейших разломов центральной части рифта. Сейсмическая) оснащена трехкомпонентным широкополосным сейсмометром Станция работает в непрерывном режиме. Регистрируются три компоненты вектора скорости сейсмических колебаний: север-юг, восток-запад и вертикальная. Параметры аппаратуры позволяют не только регистрировать локальные, региональные и удаленные землетрясения, но и фиксировать и анализировать вариации микросейсмического поля.





(a)



(б)

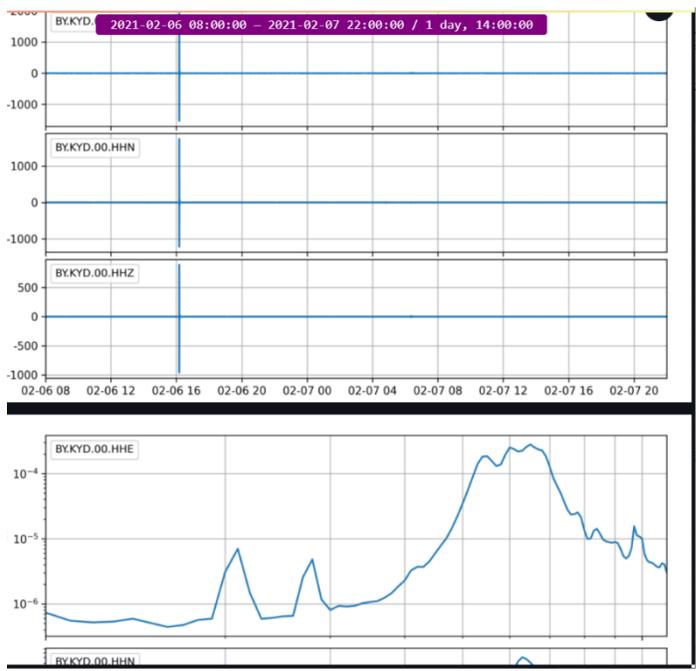
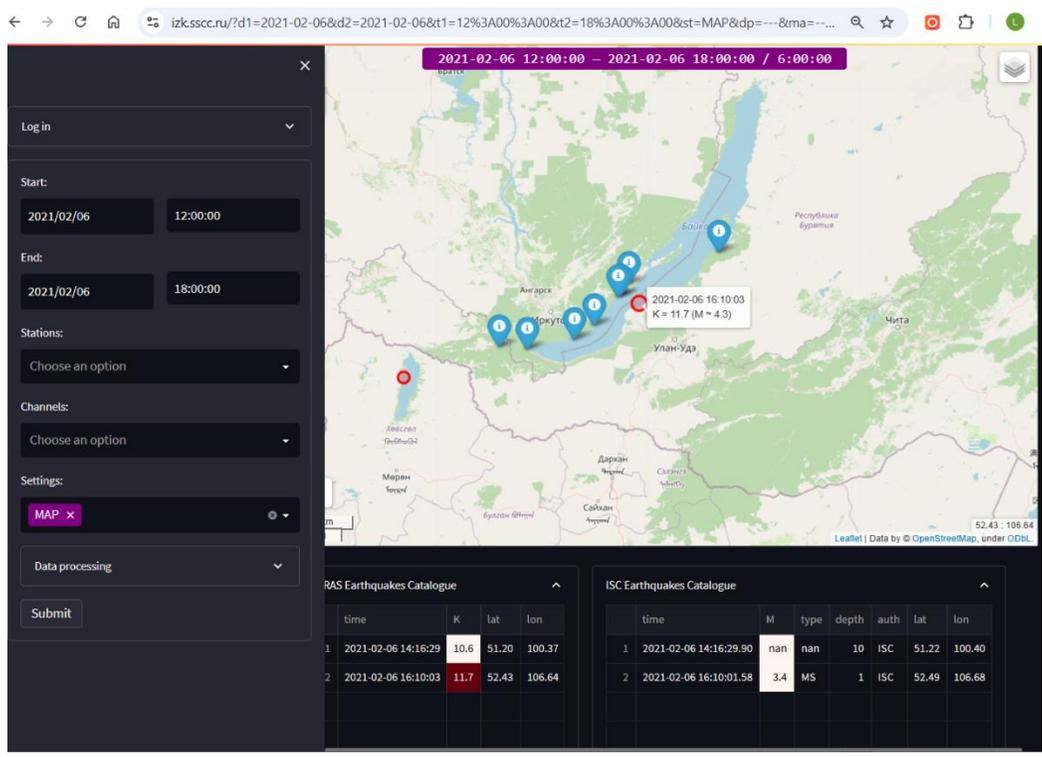
Исследуемые землетрясения

(a) – эпицентры,

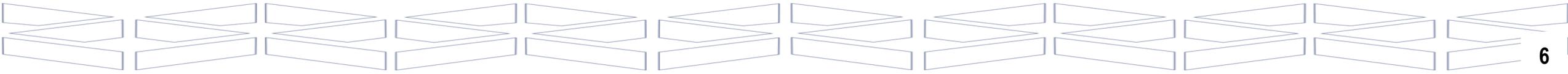
(б) – распределение по энергетическим классам

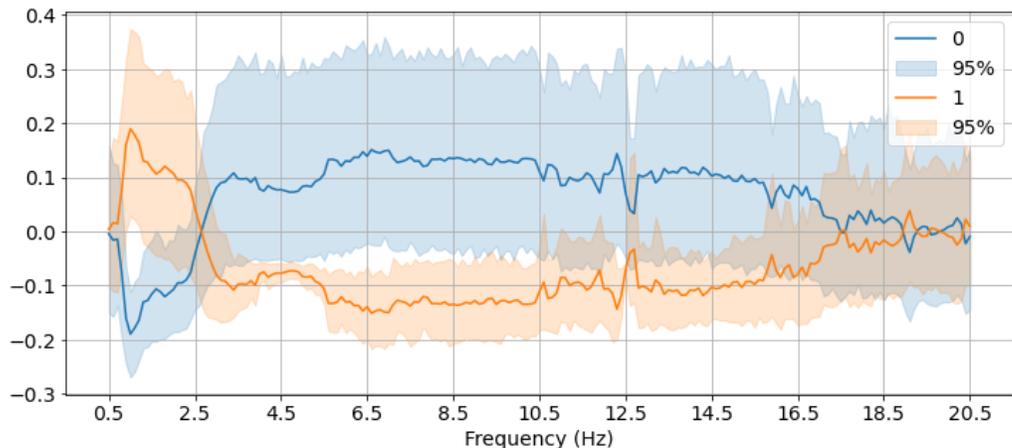
В основе используемой в настоящей работе методики поиска краткосрочных предвестников землетрясений лежит оценка вариаций спектральной плотности мощности (СПМ) микросейсмических шумов в ближней к очагу зоне до и после землетрясения.

Для анализа были выбраны 40 землетрясений различного энергетического диапазона, которые в основном локализованы в зоне влияния Обручевского, Морского и Приморского разломов. Выбранная область характеризуется как область чистого растяжения. Радиус 120 км охватывает сейсмические события, происходящие в зонах влияния этих разломов, предоставляя полный набор данных для анализа закономерностей и поиска предвестников будущих землетрясений, которые могут повлиять на регион.

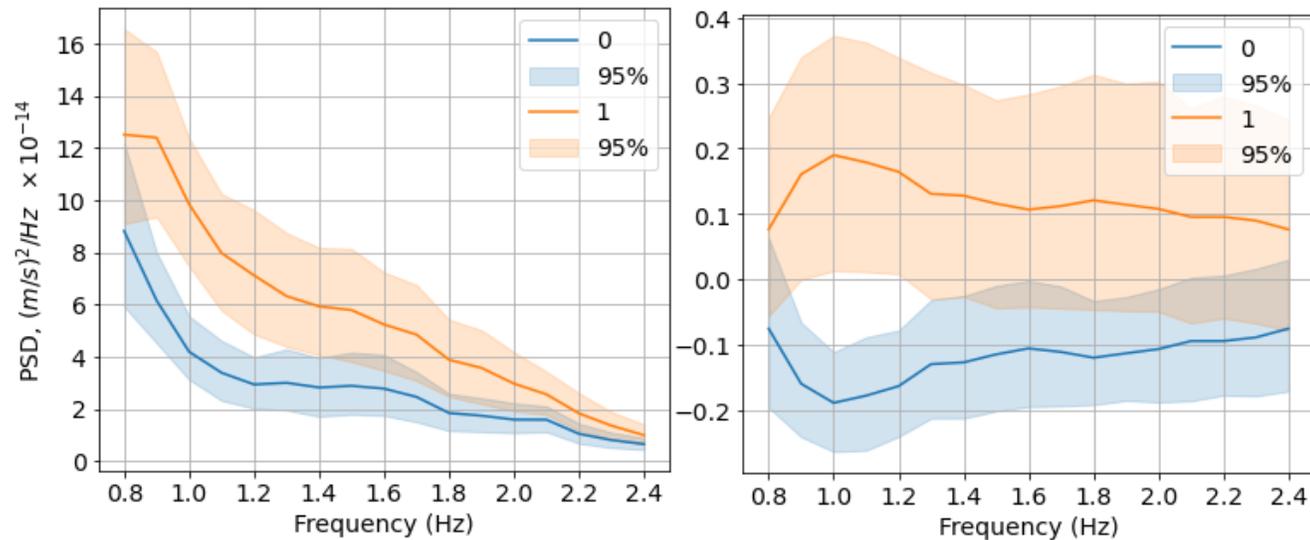


Для оценки СПМ микросейсмического шума использовались 5 10-минутных отрезков сейсмограммы с интервалом не менее 50 минут, предшествующие землетрясению – «Активные», и 5 таких же «Пассивных» отрезков, относящихся к спокойным периодам – не менее чем через 12 часов после землетрясения.





Зависимости усредненных нормализованных значений СПМ микросейсм от частоты. Обозначения: «0» (синим цветом) – неактивные (фоновые) периоды времени, «1» (красным цветом) – активные (перед землетрясениями) периоды времени



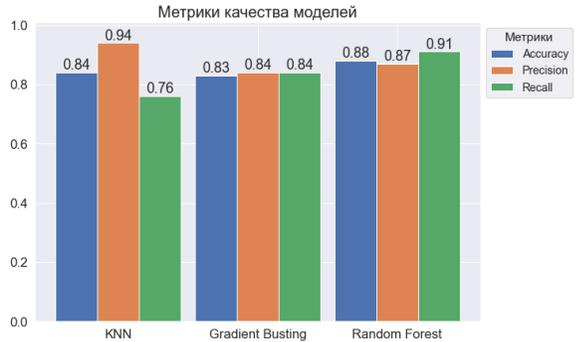
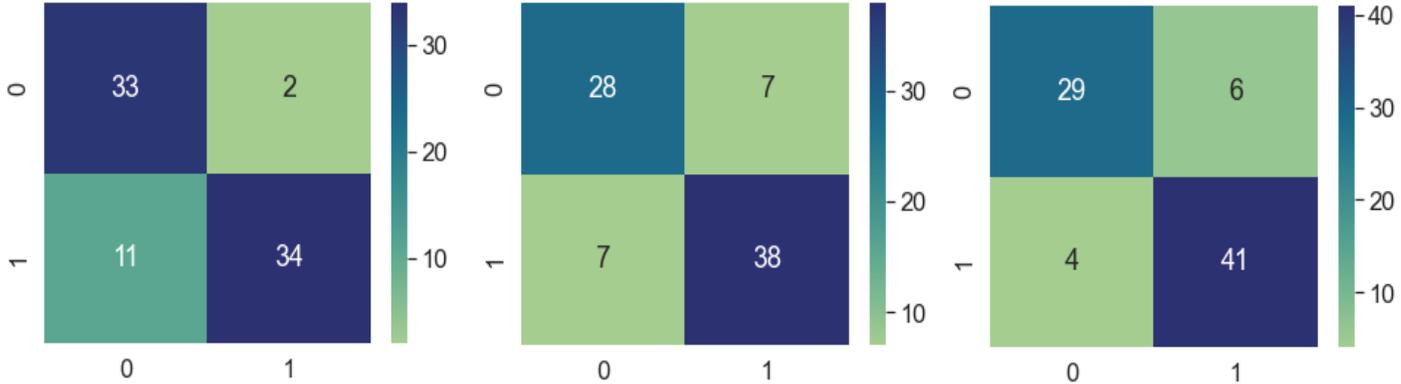
(а) (б)
*Зависимости усредненных значений СПМ от частоты.
(а) – исходные зависимости,
(б) – нормализованные зависимости*

Результирующие спектры получены усреднением 200 спектров активных образцов и 200 неактивных.

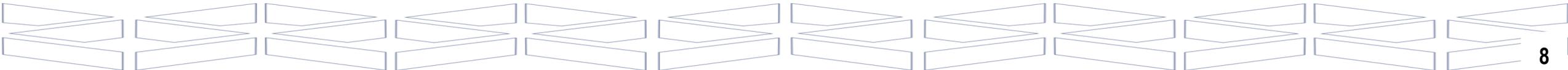
Значения СПМ из диапазона 0.8–2.4 Гц с шагом 0.1 Гц. Были вычислены и использованы в качестве входных данных для построения модели машинного обучения.

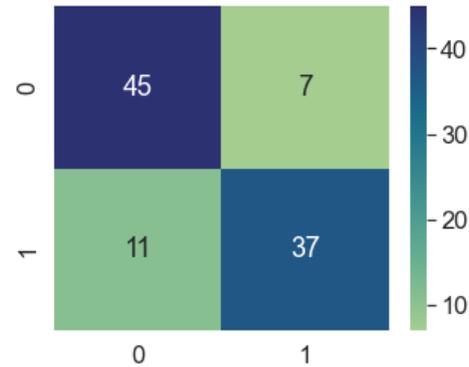
Машинное обучение

Для автоматического распознавания относится ли запись микросейсмического шума к неактивному или активному периоду, методом машинного обучения была построена модель бинарной классификации. 400 образцов СПМ микросейсмического шума для обучения и тестирования делились в отношении 3:1.



Матрицы ошибок и метрики качества моделей KNN, Gradient Busting, Random Forest





Accuracy: 0.82

Precision: 0.84

Recall: 0.77

Матрица ошибок и метрики для модели Случайный лес.

Матрица ошибок отображает статистику, полученную при тестировании модели. Тестирование производилось на ста образцах МСШ, не участвовавших в обучении.

Метрика ассигасу равна доле правильно классифицированных образцов, precision можно интерпретировать как долю образцов, названных моделью активными и при этом действительно являющихся активными, а recall показывает какую долю активных образцов из всех активных образцов нашла модель.

Полученные результаты показывают, что классификатор работает, но его качество нельзя считать достаточно высоким. В дальнейшем планируется увеличить количество исследуемых землетрясений.

Существует гипотеза о том, что исключительно перед землетрясением происходит значительный сдвиг в напряжении-деформации земной коры, что должно проявиться в аномалиях геофизических параметров. Все больше исследований, включая исследования [Bletery, Q. and Nocquet, J.-M. (2023), The precursory phase of large earthquakes; Добрынина А. А., Саньков В. А., Борняков С. А., Король С. А., Саньков А. В. Аномалии микросейсмических шумов в связи с Кударинским землетрясением], подтверждают возможность этого явления.

Однако данные сложны, зашумлены и их трудно оценить, что затрудняет их анализ и интерпретацию. Недавний всплеск исследований и приложений МО показывает, что это мощный инструмент для извлечения ценной информации из сложных наборов данных. В данной работе мы представили пример применения методов МО для обнаружения предвестников землетрясений по данным сейсмического мониторинга БРС. На примере сорока землетрясений БРС с энергетическим классом $K=9.5-14.5$ на эпицентральных расстояниях от 10 до 120 км установлено статистически значимое повышение СПМ микросейсмического шума в диапазоне 0.8–2.4 Гц за несколько часов перед толчком. На основе полученных данных методом МО создана модель для бинарной классификации записей МСШ. Зафиксированное повышение спектральной плотности мощности МСШ может классифицироваться как краткосрочный предвестник, связанный с консолидацией среды за 3–4 часа до землетрясения.

В дальнейшем планируется увеличить количество исследуемых землетрясений с тем, чтобы выяснить зависимость вариаций СПМ от сезонности, эпицентрального расстояния и энергии землетрясений.

**Брагинская Людмила
Петровна,
Григорюк Андрей Павлович,
Ковалевский Валерий
Викторович,
Добрынина Анна
Александровна**

Контакты:

ludmila@opg.sccc.ru

+ 7 913-894-47-91



ITES-2025

В работе были задействованы:

- Оборудование УНУ "Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов", входящей в состав ЦКП "Геодинамика и геохронология" Института земной коры СО РАН.
- ЦП «Комплексный геофизический мониторинг» <https://izk.sccc.ru>

Благодарим за внимание!