

Институт земной коры СО РАН развивает сеть полигонов комплексного мониторинга опасных геологических процессов

Байкальская рифтовая система является одной из наиболее сейсмически активных территорий Российской Федерации, по классификации МЧС ей присвоена первая (высшая) категория опасности. Высокая сейсмическая активность региона подтверждается как сведениями о землетрясениях прошлого (палеосейсмодислокации, сильные землетрясения по историческим данным), так и современным уровнем сейсмической активности.

Помимо землетрясений, регион характеризуется проявлениями разнообразных опасных геологических процессов, таких как сели, паводки, обвалы и оползни, лавины, карстовые проявления.

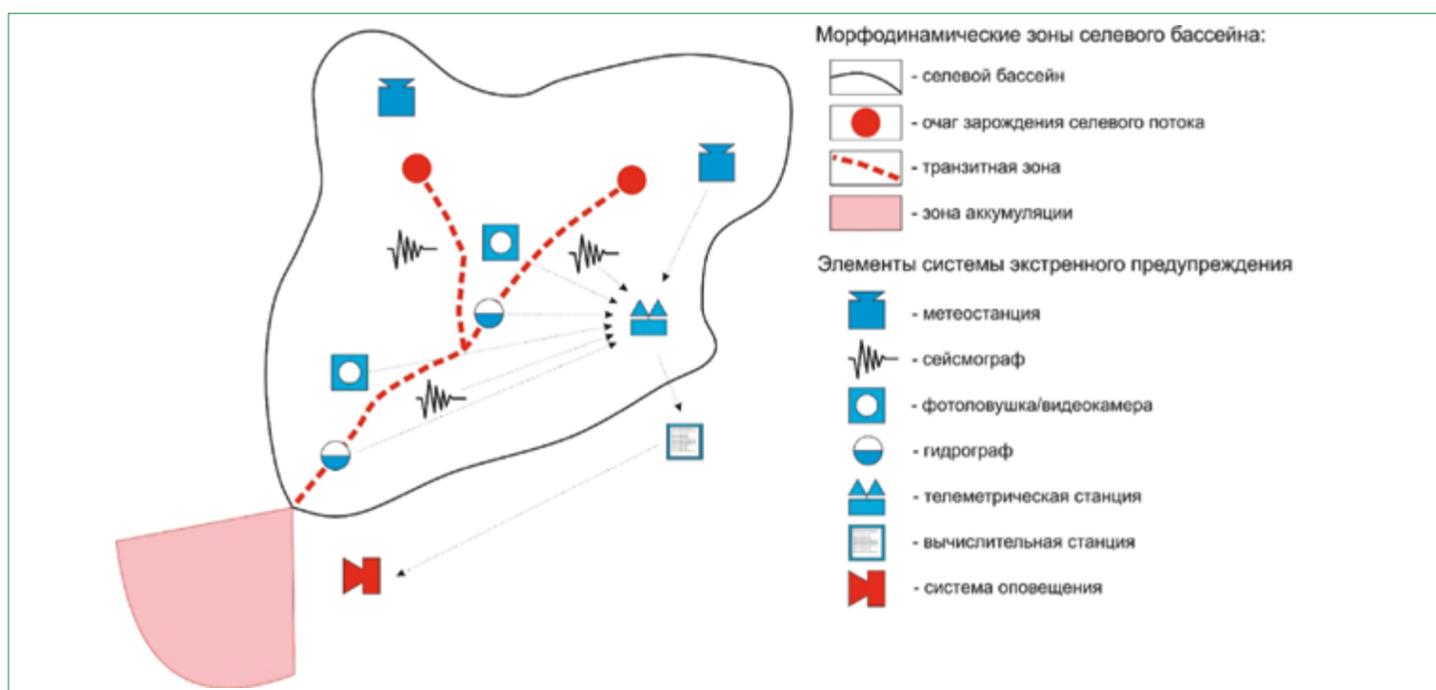
С 2020 года в рамках крупных научных проектов Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по приоритетным направлениям научно-технологического развития ИЗК СО РАН активно развивает сеть пунктов и полигонов комплексного мониторинга опасных геологических процессов на территории Байкальской рифтовой системы на основе непрерывных измерений различных геофизических полей.

Основная масса землетрясений Байкальской рифтовой системы сосредоточена в достаточно узкой полосе, протягивающейся вдоль оси рифтовых впадин, Сибирская платформа практически асейсмична, Забайкальский блок характеризуется рассеянной умеренной сейсмичностью. В самой Байкальской впадине наиболее сейсмически активной является ее южная часть, на прилегающих к ней территориях Южного Прибайкалья и Забайкалья (Иркутская область, Республика Бурятия) находятся крупные города, населенные пункты, а также опасные производства, линейные сооружения, плотина гидроэлектростанции (Иркутск), автомагистрали и линии Восточно-Сибирской железной дороги. Данные районы также отличаются высоким уровнем селеопасности (область Тункинских впадин, горное обрамление Южнобайкальской впадины). По этим причинам территория Южного Байкала была выбрана в качестве исходной для организации работ по комплексному мониторингу опасных геологических процессов.

Сеть полигонов комплексного мониторинга опасных геологических процессов расположена вдоль основных рифтовых структур юго-западного фланга Байкальского рифта на территории Иркутской области (полигоны «Листвянка», «Бугульдейка» и «Приольхонье», пункт «Узур») и на территории Республики Бурятия (пункты мониторинга «Максимиха», «Заречье», «Сухой ручей»), полигон «Южный Байкал» занимает область от южного окончания озера Байкал («Талая») до системы Тункинских впадин (полигон «Зун-Мурино»). Такое положение измерительных точек позволяет проводить наблюдения за центральной частью Байкальского рифта.

Полигоны комплексного мониторинга оснащены современным высокоточным оборудованием для мониторинга деформаций горных пород (собственная разработка ИЗК СО РАН), эманацій радона, скоростей движений и деформаций земной коры методом GPS-геодезии, магнитотеллурического поля Земли, метеопараметров, температурного режима грунтов для глубин до десяти метров и сейсмического и микросейсмического режимов.

На текущий момент все виды мониторинга работают на пяти полигонах: «Листвянка», «Бугульдейка», «Приольхонье», «Южный Байкал», в июле 2025 года закончены работы по дооснащению полигона «Зун-Мурино» в Тункинской впадине полным комплектом аппаратуры. Введение в работу этого полигона позволило расши-



Принципиальная схема размещения элементов системы предупреждения о селевой опасности

рить сеть геофизических наблюдений на территорию Тункинской долины.

Часть данных с пунктов и полигонов комплексного мониторинга поступает на сервер Центра комплексного мониторинга в ИЗК СО РАН в режиме реального времени, часть — один раз в сутки. В 2022 году совместно с Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН была разработана специальная цифровая платформа для визуализации, анализа и первичной обработки полученной информации. Платформа позволяет вывести на единый планшет данные разных видов мониторинга за выбранный период времени, провести первичную обработку сигналов и сохранить их в цифровом и растровом виде для последующего анализа. Для предварительной обработки сигналов предусмотрены различные режимы: суточная запись (вывод данных за указанные сутки), фильтр скользящего среднего, фильтр Баттерворта (один из типов электронных фильтров) и другие. На платформе реализованы также следующие виды математической обработки: энтропийный, мультифрактальный, поляризационный, спектральный типы анализа, оценка спектра по Уэлчу, а также спектрально-временной анализ.

Длинные ряды данных комплексного мониторинга используются для поиска возможных предвестников землетрясений в Байкальском рифте и последующей разработки фундаментальных основ прогноза землетрясений и других опасных геологических процессов, например селевых потоков.

На основе полученных данных и анализа архивных материалов специалисты ИЗК СО РАН предложили систему мониторинга и экстренного оповещения о начале движения селевого потока, которая представляет собой комплекс измерительного оборудования, контролирующего селеформирующие климатические условия, а также уровень и концентрацию твердой составляющей в водном либо селевом потоке.

Техническая сущность системы предупреждения заключается в следующем: при отсутствии переменных локальных источников возбуждения сейсмических

колебаний состав и уровень микросейсмического шума остаются постоянными, а поляризация колебаний в микросейсмической волне вследствие сложения сейсмических колебаний разной природы и пришедших из разных азимутов на сейсмическую станцию не имеет четко выраженной ориентации. При движении селевого потока по руслу из-за турбулентности потоков и соударений в горных породах возникают упругие колебания, которые регистрируются сейсмическими станциями и вызывают увеличение уровня и спектрального состава и поляризации микросейсмического шума.

Эффективность разработанной системы предупреждения основана на разнице скоростей селевого потока (в среднем 5–10 м/с) и скорости распространения сейсмических волн ($\approx 3,5$ км/с). В зависимости от длины русла реки, ее морфологических особенностей и мест размещения оборудования, время подачи тревожного сигнала до прохода разрушительного селевого потока через населенный пункт, трассы автомагистралей и железных дорог может составлять до 30 минут. Следует отметить, что оборудование системы предупреждения не имеет прямого (механического) контакта с селевым потоком, что позволяет системе сохранять работоспособность при прохождении селевого потока.

Комплексный мониторинг также положительно себя зарекомендовал при изучении предвестников последних ощутимых землетрясений: Быстринского землетрясения в Южном Прибайкалье, произошедшего 21 сентября 2020 года и Кударинского землетрясения в Южном Байкале, случившегося 9 декабря 2020 года. Оба события сопровождались серией предшествовавших и сопутствующих явлений различной природы, зафиксированных в разных местах плейстоценовой области (места наиболее сильных сотрясений грунта при землетрясении. — Прим. ред.) и на смежной территории. В случае Быстринского землетрясения это было изменение режима и свойств подземных вод, в предсейсмогенных вариациях напряженно-деформированного состояния породного массива, флуктуациях эманацонного поля, также был зафиксирован краткосрочный пред-

вестник в динамике деформаций пород на полигоне «Южный Байкал» («Талая»). В случае Кударинского землетрясения краткосрочные предвестники наблюдались на полигонах «Бугульдейка» и «Приольхонье» в данных деформационного, микросейсмического, магнитотеллурического, эманацонного мониторинга. Совпадение данных деформационного и микросейсмического мониторинга позволило охарактеризовать предварительную модель развития процессов в очаге до и после сильного землетрясения и предложить на ее основе метод определения приближения сильного сейсмического события.

За годы функционирования сети полигонов комплексного мониторинга установлено, что в ближней к очагу зоне (до 150 км) сильные сейсмические события проявляются практически во всех изучаемых в режиме мониторинга полях. Характер и интенсивность этих проявлений зависят от параметров землетрясения (положение, магнитуда, глубина, механизм очага) и от локальных геологических условий полигонов мониторинга. В целом, полученные результаты свидетельствуют об эффективности сети полигонов комплексного мониторинга для изучения предвестников сильных землетрясений на территории Байкальского рифта. В дальнейшем ИЗК СО РАН в рамках совместных работ с другими научными организациями планирует расширить сеть полигонов на территории с отличным от рифтового (зона растяжения земной коры) геодинамическим режимом: зонах сжатия (Кавказ) и субдукции (Камчатка).

Работы проводятся в рамках проектов Минобрнауки России: проект № 075-15-2020-787 «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории», проект № 075-15-2024-533 «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды».

Анна Добрынина, ИЗК СО РАН
Схема предоставлена
А. А. Рыбченко