

## Информационная система для комплексных геофизических исследований в Байкальском регионе

Л. П. БРАГИНСКАЯ<sup>1,\*</sup>, А. П. ГРИГОРЮК<sup>1</sup>, В. В. КОВАЛЕВСКИЙ<sup>1</sup>, И. К. СЕМИНСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Иркутск, Россия

\*Контактный автор: Брагинская Людмила Петровна, e-mail: ludmila@org.sscs.ru

Поступила 15 мая 2023 г., доработана 01 сентября 2023 г., принята в печать 06 сентября 2023 г.

Представлена информационная система для визуализации и вычислительного анализа данных комплексного геофизического мониторинга, который проводится Институтом земной коры СО РАН. Система предназначена для интеграции и анализа данных, поступающих с нескольких геофизических полигонов Байкальского региона, а также оценки состояния геологической среды и прогнозирования проявлений опасных процессов. Система построена по клиент-серверной архитектуре. Хранение, обработка и анализ данных осуществляется на сервере, к которому пользователи могут обращаться через Интернет посредством веб-браузера. Информационная система обеспечивает оперативность обработки и визуализации на единой временной сетке данных сейсмологического, магнитотеллурического, эманионного, деформометрического, геодезического, инженерного-геологического и гидрогеологического мониторинга для пунктов наблюдений в Байкальском регионе. Благодаря сервисам, предоставляемым системой, удалось повысить эффективность решения задач прогнозирования динамики сейсмической активности геофизическими методами.

*Ключевые слова:* геофизический мониторинг, сейсмическая активность, информационная система.

*Цитирование:* Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Ковалевский В.В., Семиинский И.К. Информационная система для комплексных геофизических исследований в Байкальском регионе. Вычислительные технологии. 2023; 28(6):81–94. DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.008.

### Введение

Землетрясения входят в число самых опасных природных явлений на нашей планете [1]. Увеличение плотности населения, урбанизация, наличие таких инфраструктурных объектов, как гидроэлектростанции, мосты, высотные здания, приводят к росту возможных негативных последствий от крупных сейсмических событий. Кроме того, землетрясения могут провоцировать оползни, обвалы и сели в районах активного природопользования.

Байкальский регион является сейсмически активным в связи с развитием крупной межблоковой границы — Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Из всех континентальных рифтовых систем планеты БРЗ — вторая по протяженности в мире и крупнейшая в Евразии, она расположена во внутренней части континента, а впадина оз. Байкал —

ее центральное звено. Рифтовые структуры простираются от северо-западной Монголии до южной Якутии и состоят из серии впадин (крупнейшая из них — Байкальская) и разделяющих их поднятий. Процесс формирования Байкальского рифта продолжается и в настоящее время, проявляясь в повышенной сейсмической активности [2, 3]. Последним разрушительным землетрясением было Цаганское ( $M_w \approx 7.5$ ) в дельте р. Селенги 12 января 1862 г. В результате катаклизма интенсивностью в эпицентре не менее 10 баллов под воды оз. Байкал ушел участок суши площадью около 230 кв. км, ныне — залив Провал. Вместе с сушей под воду ушли три бурятские деревни и погибли три человека и тысячи голов скота. Очевидно, что, если бы эпицентр землетрясения находился ближе к урбанизированному кластеру, не удалось бы избежать тысяч человеческих жертв.

Свидетельством неослабевающей сейсмической активности БРЗ являются инструментально зафиксированные землетрясения различной интенсивности и энергетического класса, произошедшие в последние десятилетия в Байкальском регионе и на сопредельных территориях — Тыва, Монголия. В год на территории БРЗ регистрируются до нескольких тысяч землетрясений, в основном слабых. Ощутимые события с магнитудой 5.0 и более происходят в Прибайкалье со средней периодичностью в 5 лет. За последние 300 лет здесь зарегистрировано более пятнадцати крупных сейсмособытий интенсивностью выше семи баллов. К наиболее сильным относятся: Южно-Байкальское (25.02.1999) с магнитудой 6.0; Кичерское (21.03.1999) — 5.8; Уоянское (16.09.2003) — 5.9; Чаруодинское (10.11.2005) — 5.9; Култукское (27.08.2008) — 6.3. Кударинское землетрясение (магнитуда 5.5) произошло 10 декабря 2020 г. в Байкальском заливе Провал, который сам образовался в результате сильного землетрясения в 1862 г. На юге Байкала 8 июня 2022 г. произошло землетрясение с эпицентром на акватории в 18 км от пос. Большое Голоустное. Магнитуда предварительно оценивалась в 5.7.

В 2020–2023 гг. фиксируется смещение сейсмоактивности в густонаселенную южную и центральную части Байкальского рифта [4]. По данным палеосейсмических реконструкций установлено, что периодичность землетрясений уровня, подобного Цаганскому, в Байкальском рифте составляет около 180 лет [5]. Существует вероятность, что уже нынешнее молодое поколение будет свидетелем очередного разрушительного землетрясения. Заложить основы инструмента прогноза, а значит обеспечить возможности принятия корректирующих действий, необходимо уже сейчас.

В прогнозировании землетрясений наиболее часто используются методы, основанные на вероятностных оценках. Эти оценки выполняются путем использования данных, хранящихся в сейсмических каталогах. Расчеты могут оценить вероятность того, что землетрясение определенной магнитуды произойдет в течение временного окна в определенной области. В настоящее время основной тенденцией развития вероятностного прогноза землетрясений становится применение в исследованиях методов машинного обучения [6]. При этом оцениваются как пригодность для прогнозирования землетрясений архитектур известных нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения, так и использование в качестве входных данных сейсмических параметров, которые отражают сейсмический потенциал исследуемого региона [7].

Оценка перспектив прогнозирования землетрясений, основанного на выявлении параметров среды, которые считаются предвестниками, до сих пор вызывает споры в научном сообществе. Хотя имеется множество подтвержденных фактов об аномальном поведении ряда геофизических и геохимических характеристик накануне землетрясений, на практике за предвестниками обычно либо не следуют сейсмические события,

либо их трудно обнаружить. Два последних мегаземлетрясения с магнитудой 9 (Суматранское — 26 декабря 2004 г. и Тохоку — 11 марта 2011 г.) не были предсказаны.

6 февраля 2023 г. землетрясение магнитудой 7.8 произошло в южной и центральной частях Турции, а также в северной и западной Сирии. Землетрясение стало сильнейшим в Турции за более чем 80 лет. Примерно через 9 ч землетрясение магнитудой 7.6 произошло к северо-востоку от первого, в провинции Кахраманмараш [8]. В отчете парламентской комиссии Турции [9] говорится, что землетрясение затронуло 14 млн человек, из которых 3 млн покинули регион, число погибших составляет 50 399 человек, число раненых — 107 204 человека. Оба землетрясения сильнее ранее зарегистрированных в этом регионе, а карты вероятностной оценки сейсмической опасности Восточной Анатолии [10] показывают, что сейсмоопасность в районах, подвергшихся катастрофическим разрушениям, была недооценена.

Последовательность землетрясений в Кахраманмараше в очередной раз ставит вопрос об актуальности прогноза сильных землетрясений и защищенности территории от тяжелых последствий. Поскольку приоритетной задачей повышения безопасности населения являются работы по совершенствованию оценок сейсмической опасности и уязвимости регионов, исследования, направленные на решение проблемы краткосрочного прогноза и связанное с ними выявление предвестников, продолжаются.

В последние годы появился ряд научных публикаций, в которых рассмотрены достоверные данные о возможных предвестниках землетрясений, признанные всем научным сообществом [11]. Высказываются предположения об успешном использовании в краткосрочном прогнозировании методов сейсмического просвечивания, измерения акустических эмиссий, теплового режима и дегазации разломных зон [12], наблюдений сейсмических процессов и вариаций магнитного поля Земли [13].

Многие исследователи связывают решение проблемы прогноза землетрясений с системным подходом к получению, обработке и комплексному анализу геолого-геофизической и сейсмологической информации. Предлагается выявлять предвестники землетрясений по многомерным системам геофизического мониторинга с применением визуальных и формализованных методов анализа [14]. Целью анализа многомерных временных рядов систем мониторинга может стать выявление как трендов сигналов, полученных различными методами мониторинга, так и аномалий, в том числе случайных флуктуаций параметров сигналов, а также поиск согласованности вариаций наблюдаемых параметров, относящихся к сигналам различной физической природы и разнесенным пунктам системы геофизического мониторинга. В Интернете представлен ряд информационных систем, решающих задачи интеграции сейсмологической информации и управления сейсмологическими данными на основе современных информационных технологий [15, 16].

В настоящей работе приведена разработанная авторами информационная система (ИС), позволяющая производить на единой временной сетке анализ многомерных временных рядов, скалярными компонентами которых являются результаты измерения физически разнородных геофизических величин в разнесенных пунктах сети мониторинга Байкальского региона.

Информационная система геофизического мониторинга и прогнозирования сейсмической активизации характеризуется мультидисциплинарностью (используются данные деформометрии, эманацционной активности радона, магнитотеллурики, сеймики и т. п.) и широким набором вычислительных и ГИС-сервисов, предоставляемых пользователям в режиме онлайн. В работе использовался опыт создания информационно-

вычислительных систем для геофизических исследований в ИВМиМГ СО РАН [17]. Близким аналогом ИС может служить также разработанный лабораторией гидрологии и гидрофизики ЛИИ СО РАН веб-сервис для мониторинга гидрофизических и гидрохимических параметров оз. Байкал [18]. Сервис доступен в Интернете по адресу <https://hlserver.lin.irk.ru/shs/rinko>.

## 1. Стратегия комплексного геофизического мониторинга Байкальской рифтовой зоны

Комплексный геофизический мониторинг БРЗ базируется на организации сети непрерывных долговременных наблюдений за параметрами геофизических полей на исследуемой территории [19, 20]. Мониторинг включает регистрацию, а также дальнейшую оперативную обработку и интерпретацию данных с выходом на прогнозные оценки. Институтом земной коры СО РАН создана пилотная сеть комплексного геофизического мониторинга, состоящая из трех полигонов: “Приольхонье”, “Бугульдейка” и “Листвянка” [19]. Основу наблюдательной сети в пределах каждого полигона составляет пункт комплексного мониторинга. Инфраструктуру полигона дополняют станции систематических сезонных измерений и наблюдений за инженерно-геологическими и другими явлениями. Измерения производятся с использованием современного оборудования. Это радиометры, температурные логгеры, магнитотеллурические станции, регистраторы режима подземных вод, сейсмометры, GPS-приемники, деформометры, метеостанции и др. Приборы устанавливаются на поверхности земли, а также в небольших подземных бункерах и скважинах, чтобы снизить влияние атмосферных факторов на временные ряды наблюдаемых параметров. Оборудование для сбора, преобразования и передачи данных располагается в павильонах на поверхности [20]. Геофизические и метеорологические наблюдения на сети станций позволяют выявить связь вариаций геофизических полей с различными природными факторами.

Создание пилотной сети комплексного мониторинга совпало с периодом сейсмической активизации, в котором установленная ранее периодичность землетрясений была существенно нарушена. В течение полугода (сентябрь 2020 г. — январь 2021 г.) в БРЗ произошло три достаточно сильных землетрясения (Быстринское, Кударинское, Хубсугульское) интенсивностью 5 баллов, которые проявились в крупных городах Прибайкалья.

На основе анализа данных комплексного мониторинга, который был проведен специалистами ИЗК СО РАН, предложен следующий сценарий активизации развития БРЗ в период 2020–2021 гг. [19]. Процесс был “запущен” Быстринским землетрясением (21.09.2020,  $M_w = 5.4$ ), в результате которого южная часть Сибирского блока сместилась в северо-западном направлении. Это привело к накоплению избыточных напряжений в его тыловой части и, как следствие, их разрядке в режиме растяжения посредством Кударинского землетрясения (09.12.2020,  $M_w = 5.5$ ). “Высвобождение” северо-западной части Забайкальского блока привело к его смещению на восток и инициированию Хубсугульского землетрясения (12.01.2021,  $M_w = 6.8$ ) с субширотной ориентацией оси растяжения. Близость во времени достаточно сильных для БРЗ сейсмических событий обусловлена тем, что они произошли в зонах крупных рифтообразующих разломов, определяющих кинематику главных блоков при формировании единой межплитной границы.

Одной из важнейших задач является поиск предвестников на базе цифровой трансформации и обработки данных комплексного мониторинга. Специалистами ИЗК СО РАН установлен ряд закономерностей, которые можно отнести к кратко- и среднесрочным предвестникам. На основе формализации выявленных знаний могут быть сформированы базы экспертных правил для применения методов интеллектуального анализа данных и создания методики автоматического поиска предвестников.

К краткосрочным предвестникам можно отнести:

- эффект возникновения автоволновых колебаний во временных реализациях деформаций горных пород перед землетрясением [21];
- значительное понижение уровня сейсмического шума в диапазоне высоких частот (25–40 Гц) за период от десятков минут до несколько часов перед толчком или периодическое увеличение амплитуды колебаний по горизонтальным компонентам в частотном диапазоне 0.01–0.1 Гц за период от 10 дней до землетрясения и до 4 дней — после него [22, 23];
- выявленные в результате магнитотеллурического мониторинга  $U$ -образные колебания, зарегистрированные посредством скважинных измерений [24].

К среднесрочным предвестникам можно отнести:

- нарушение связи между вариациями атмосферного давления и концентрацией почвенного радона [25];
- выявленное в результате магнитотеллурического мониторинга изменение электрического сопротивления на глубине.

Существенную роль в повышении эффективности геофизических исследований играет разработанная специалистами ИВМиМГ СО РАН информационная система, которая позволяет проводить обработку, вычислительный анализ и синхронную визуализацию данных различных видов мониторинга на одной временной сетке.

## 2. Архитектура цифровой платформы

Авторами разработана ИС (<http://izk.sssc.ru>) для интеграции и анализа данных мониторинга, поступающих с нескольких полигонов, расположенных в пределах Байкальского региона, с целью выявления аномалий и трендов во временных рядах, которые могут интерпретироваться как предвестники землетрясений.

Взаимодействие пользователя с ИС осуществляется посредством панели управления, которая представляет собой графический веб-интерфейс, дающий возможность пользователям управлять функциональными задачами, выбирая для визуализации сигналов пункты, виды и каналы мониторинга, интервалы времени наблюдений, виды обработки и анализа данных. Пункты и методы мониторинга перечислены на стартовой странице ИС (рис. 1). Там же приведены доступные методы предварительной обработки данных, включая заполнение пропусков данных, удаление выбросов, и различные методы фильтрации (линейная частотная, Савицкого–Голея, обработка в скользящем окне и др.). Набор методов анализа данных включает различные виды спектрального и вэйвлет-анализа, мультифрактальный и энтропийный анализ, корреляционный анализ.

Информационная система обладает гибкими инструментами графического представления экспериментальных реализаций. Ряды длиной многие миллионы точек отображаются практически без задержки, можно “на лету” развернуть любой фрагмент ряда со сколько угодно подробной детализацией. Оси координат размечаются в реальной

календарной шкале, причем степень детализации этой шкалы оптимизируется динамически. Нет ограничений на совместное отображение данных, измеряемых с разной периодичностью, с несовпадающими датами начала и окончания наблюдений. Авторизованные в системе пользователи имеют возможность выгружать выбранные наборы данных на свой компьютер в формате CSV.

Структурная схема ИС приведена на рис. 2. Предполагается, что коллектор данных должен периодически подгружать данные с пунктов мониторинга, куда они поступают в реальном времени непосредственно с датчиков. Данные приводятся к единому формату и помещаются в локальное хранилище. Веб-приложение обеспечивает взаимодействие с пользователями рабочих станций. В соответствии с запросом серверный сценарий извлекает нужные данные из локального хранилища, производит их анализ и визуализацию и отправляет результат пользователю. Все процедуры выборки данных, математической обработки, фильтрации, анализа и прогнозирования выполняются библиотеками языка Python.

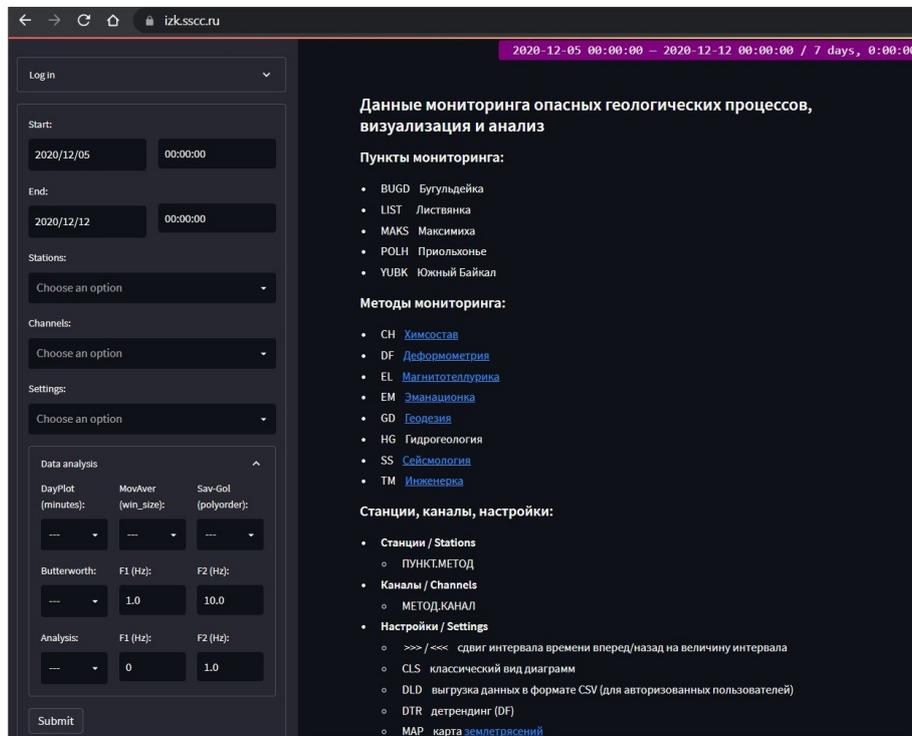


Рис. 1. Стартовая страница информационной системы в веб-браузере

Fig. 1. Information system starting page in a web browser

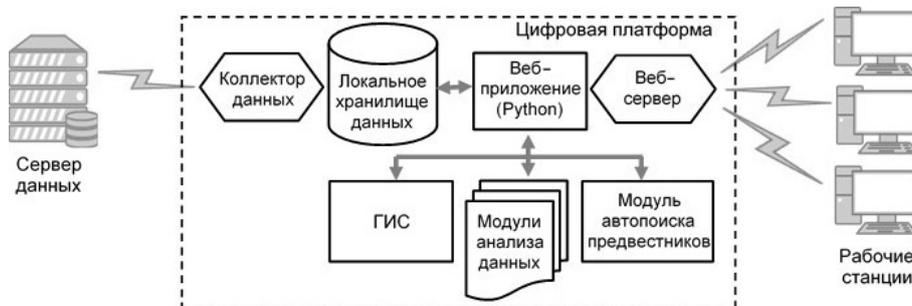


Рис. 2. Структурная схема информационной системы

Fig. 2. Structural diagram of the information system

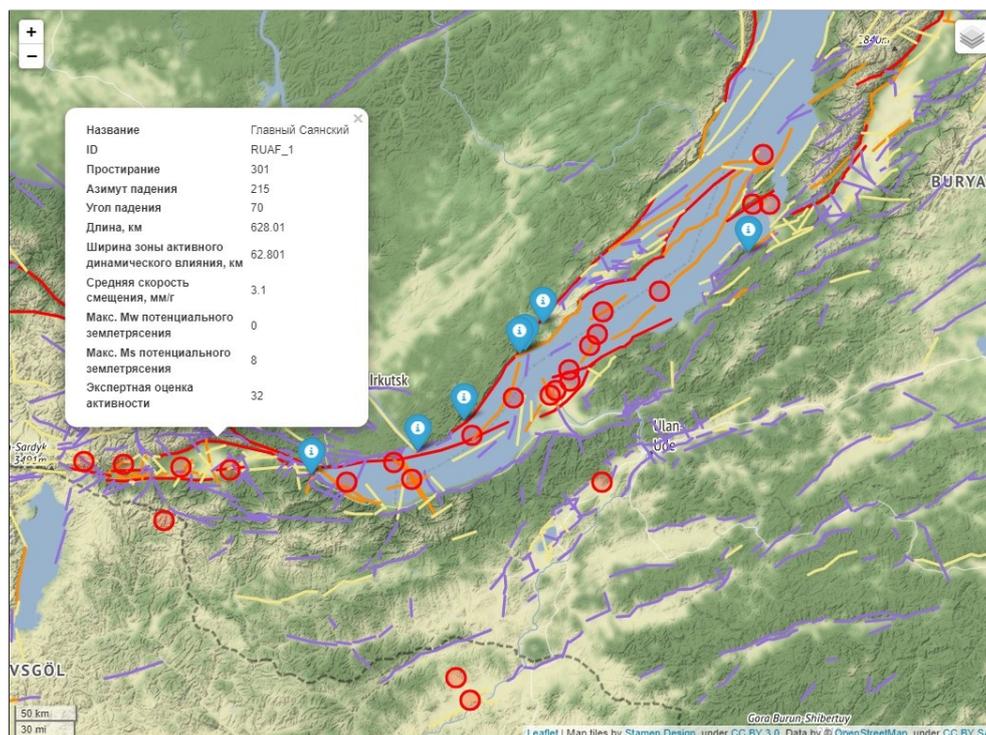


Рис. 3. ГИС-слой информационной системы

Fig. 3. GIS layer of the information system

Все настройки на панели управления синхронизируются с адресной строкой браузера, а параметры адресной строки задают состояние панели управления. Это позволяет исследователям запоминать конфигурацию ИС в виде ссылок и обмениваться ими с коллегами, осуществляя эффективное взаимодействие в процессе работы.

В состав ИС входит ГИС на базе Python-библиотеки Folium и карт OSM. В интерактивном режиме доступны следующие ГИС-слои (рис. 3):

- активные геологические разломы [26];
- землетрясения за период 1862–2012 гг., вызвавшие сейсмические события;
- землетрясения из каталога Байкальского филиала ЕГС РАН (<http://seis-bykl.ru>);
- пункты мониторинга.

### 3. Полученные результаты

Тестовые испытания ИС начались в феврале 2022 г. Благодаря полученной возможности обеспечивать комплексное наблюдение на единой временной сетке результатов различных видов геофизического мониторинга (эманационного, деформометрического, геодезического, инженерного-геологического, гидрогеологического, электротеллурического, сейсмологического) удалось повысить оперативность обработки и эффективность взаимодействия исследователей различных направлений мониторинга.

К первым результатам комплексной обработки и сопоставления информации можно отнести выявление краткосрочных предвестников Кударинского землетрясения (9.12.2020,  $M_w = 5.5$ ) в данных электротеллурического мониторинга полигона Бугульдейка (ряд наблюдений вертикальной компоненты электротеллурического поля —  $E_z$  для линии 11 м).

На рис. 4 представлены визуализированные данные электротеллурического мониторинга в период подготовки Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 г. На спектрограмме  $E_z$  отчетливо выделяется изменение спектра сигнала примерно за сутки до землетрясения. Характер флуктуаций ряда  $E_z$  существенно изменился — вместо хаотичных колебаний появились отчетливые  $U$ -образные колебания с частотой 0.5 Гц и относительной амплитудой 1.5–2.5 мВ. В течение около 1.5 ч после их появления амплитуда вариаций несколько увеличилась, а частота уменьшилась до 0.03 Гц. Важно отметить, что подобные флуктуации не наблюдались за весь период магнитотеллурических наблюдений.

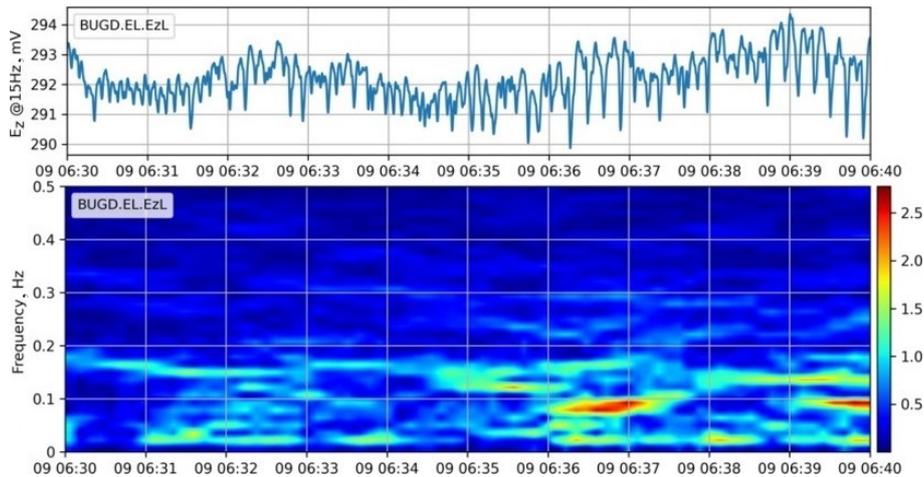


Рис. 4. Интерфейс информационной системы. Ряд наблюдений  $E_z$  (вверху) и спектрограмма (внизу)

Fig. 4. Interface of the information system.  $E_z$  observation series (top) and spectrogram (bottom)

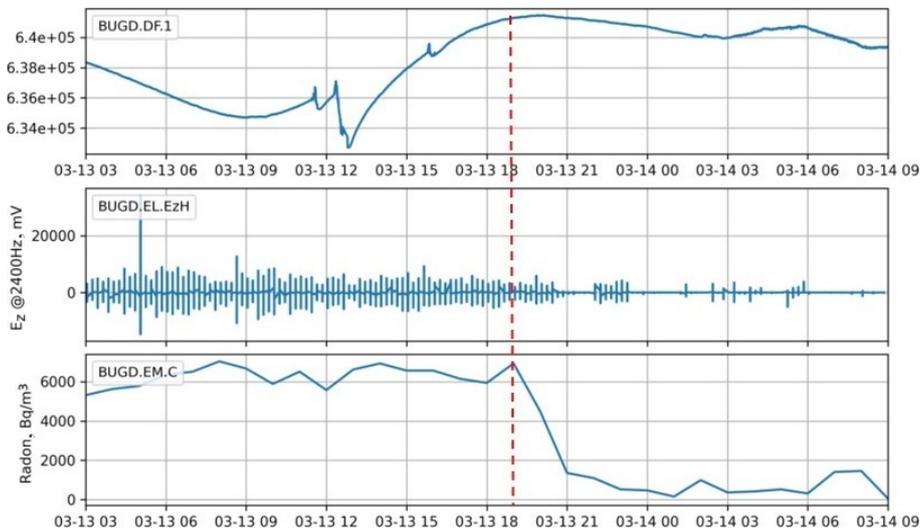


Рис. 5. Интерфейс информационной системы. Данные деформометрического (данные С.А. Борнякова), магнитотеллурического и эманационного (данные А.А. Боброва) мониторинга в период подготовки и после землетрясения 14.03.2021 г. (момент землетрясения показан красной пунктирной линией)

Fig. 5. Interface of the information system. Data from deformometric (data from S.A. Bornyakov), magnetotelluric and emanation (data from A.A. Bobrov) monitoring during the period of preparation and after the earthquake of 03/14/2021. (the moment of the earthquake is shown by the red dotted line)

Интересным наблюдением, сделанным благодаря возможностям совместной визуализации данных комплексного мониторинга, является отражение подготовки землетрясения 14.03.2021 г. ( $M_w = 2.7$ ) вблизи пункта наблюдений (рис. 5). Подготовка землетрясения проявилась в виде роста деформаций породного массива, резкого снижения объемной активности радона в почве и прекратившихся раньше относительно нормальных (суточных) флуктуаций ряда  $E_z$ .

## Заключение

Разработанная ИС предоставляет возможность исследователю визуализировать результаты анализа сигналов от разных видов геофизического мониторинга на единой временной сетке, что позволяет выявить согласованность в различных аномальных проявлениях параметров. Не менее важны сервисы, позволяющие алгоритмически определять корреляции между рядами наблюдений, что может существенно повысить эффективность исследований.

Дальнейшее развитие ИС авторы связывают не только с развитием алгоритмических методов обработки многомерных рядов, но и с формализацией экспертных правил и машинным обучением, что позволит автоматизировать поиск трендов и корреляции аномалий параметров полей различной физической природы.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке проекта Минобрнауки РФ № 075-15-2020-787 “Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории” и проекта НИР ИВМиМГ СО РАН № 0251-2022-0004.

Авторы благодарны руководителям и участникам проекта чл.-корр. РАН Д.П. Гладкочубу, д. г.-м. н. К.Ж. Семинскому, к. г.-м. н. С.А. Борнякову, к. ф.-м. н. А.А. Добрыниной, к. г.-м. н. В.А. Санькову, д. г.-м. н. А.В. Поспееву, к. г.-м. н. А.А. Боброву и другим специалистам, обеспечившим проведение геофизического мониторинга в Прибайкалье, а также за полезные советы, высказанные при создании информационной системы комплексного геофизического мониторинга.

## Список литературы

- [1] Леви К.Г., Аржанникова А.В., Буддо В.Ю., Кириллов П.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ружич В.В., Саньков В.А. Современная геодинамика Байкальского рифта. Разведка и охрана недр. 1997; (1):10–20.
- [2] Logatchev N.A., Florensov N.A. The Baikal system of rift valleys. Tectonophysics. 1978; 45(1):1–13. DOI:10.1016/0040-1951(78)90218-4.
- [3] Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта. Геология и геофизика. 2003; 44(5):391–406.
- [4] Землетрясения на Байкале. Адрес доступа: [http://irkipedia.ru/content/zemletryaseniya\\_na\\_baykale](http://irkipedia.ru/content/zemletryaseniya_na_baykale) (дата обращения 01.11.2023).
- [5] Мельникова В.И., Гилева Н.А., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. с  $M_w = 6.3$ ,  $I_0 = 8-9$  (Южный Байкал). Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. Обнинск: ГС РАН; 2014: 386–407.
- [6] Galkina A., Grafeeva N. Machine learning methods for earthquake prediction: a survey. Proceedings of the Fourth Conference on Software Engineering and Information Management (SEIM 2019). Saint Petersburg, April 2019. CEUR Workshop Proceedings.

- 2019; (2372):25–32. Available at: [https://ceur-ws.org/Vol-2372/SEIM\\_2019\\_paper\\_31.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-2372/SEIM_2019_paper_31.pdf) (accessed 14.11.2023).
- [7] **Yousefzadeha M., Seyyed Ahmad H., Farnaghic M.** Spatiotemporally explicit earthquake prediction using deep neural network. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021; 144. DOI:10.1016/j.soildyn.2021.106663.
- [8] **Dal Zilio L., Ampuero J.P.** Earthquake doublet in Turkey and Syria. *Communications Earth & Environment*. 2023; 4(71). DOI:10.1038/s43247-023-00747-z.
- [9] Turkey-earthquake: emergency situation report (03.05.2023). Available at: <https://reliefweb.int/report/turkiye/turkey-earthquake-emergency-situation-report-03052023> (accessed 01.11.2023).
- [10] **Gulerce Z., Tanvir Shah S., Menekse A., Arda Ozacar A., Kaymakci N., Onder Cetin N.** Probabilistic seismic-hazard assessment for East Anatolian fault zone using planar fault source models. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2017; 107(5):2353–2366. DOI:10.1785/0120170009.
- [11] **Martinelli G.** Previous, current, and future trends in research into earthquake precursors in geofluids. *Geosciences*. 2020; 10(5). DOI:10.3390/geosciences10050189.
- [12] **Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А.** Ранние проявления краткосрочных предвестников в динамике напряженно-деформированного состояния Южной Калифорнии. *Физика Земли*. 2021; (4):78–90. DOI:10.31857/S0002333721040049.
- [13] **Собисевич Л.Е., Рогожин Е.А., Собисевич А.Л., Шень То, Лю Цзяо.** Инструментальные наблюдения геомагнитных возмущений перед сейсмическими событиями в отдельных районах КНР. *Сейсмические приборы*. 2016; 52(1):39–60.
- [14] **Любушин А.А.** Прогностические свойства случайных флуктуаций геофизических характеристик. *Междисциплинарный научный и прикладной журнал “Биосфера”*. 2014; 6(4):319–338. DOI:10.24855/biosfera.v6i4.177.
- [15] **Хритова М.А.** Информационно-аналитическая система для мониторинга землетрясений Прибайкалья и Забайкалья: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: специальность 25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых. Иркутск; 2015: 25.
- [16] **Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В.** Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции. *Геофизические исследования*. 2020; 21(3):66–91. DOI:10.21455/gr2020.3-5.
- [17] **Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Ковалевский В.В.** Научная информационная система “Активная сейсмология” для комплексных геофизических исследований. *Вестник КРАУНЦ. Науки о земле*. 2015; 1(25):94–98.
- [18] **Макаров М.М., Кучер К.М., Асламов И.А., Петров И.А.** Система мониторинга гидрофизических и гидрохимических параметров озера Байкал. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018; 12(1):120–124. DOI:10.17513/mjprf.12533. Адрес доступа: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12533> (дата обращения 01.11.2023).
- [19] **Бычков И.В., Гладкочуб Д.П., Ружников Г.М.** Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории. Новосибирск: СО РАН; 2022: 345. DOI:10.53954/9785604788943. Адрес доступа: <https://health-family.ru/upload/medialibrary/72b/td6mdxurqwodjfgn48qo3n2ownprvxохс.pdf> (дата обращения 13.11.2023).
- [20] **Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Боб-**

- ров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты. Геодинамика и тектонофизика. 2022; 13(5):66–77. DOI:10.5800/GT-2022-13-5-0677.
- [21] Борняков С.А., Мирошниченко А.И., Встовский Г.В., Синцов А.Е., Салко Д.В. Новый подход к прогнозу сильных землетрясений в Южно-Байкальском регионе на основе данных мониторинга деформации горных пород: методология и результаты. Геодинамика и тектонофизика. 2022; 13(2):85–88. DOI:10.5800/GT-2022-13-2-0588.
- [22] Добрынина А.А., Саньков В.А., Борняков С.А., Король С.А., Саньков А.В. Аномалии микросейсмических шумов перед Кударинским землетрясением 9 декабря 2020 г. с  $Mw = 5.6$ . Материалы XX Всероссийской научной конференции “Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту”. Иркутск: Институт земной коры СО РАН; 2022: 83–84.
- [23] Король С.А., Саньков А.В., Добрынина А.А., Саньков В.А. Вариации уровня микросейсм перед землетрясениями в Байкальской рифтовой системе. Геодинамика и тектонофизика. 2022; 13(2):0632. DOI:10.5800/GT-2022-13-2s-0632. Адрес доступа: <https://www.gt-crust.ru/jour/article/view/1397/0>.
- [24] Семинский И.К., Поспеев А.В. Отражение крупных для Байкальского рифта землетрясений 2020–2021 гг. в данных режимных наблюдений магнитотеллурического поля Земли. Физика Земли. 2022; (4):46–55. DOI:10.31857/S0002333722040093.
- [25] Семинский К.Ж., Бобров А.А., Михайлов А.А., Семинский А.К. Поиски предвестников землетрясений в Прибайкалье на базе комплексной обработки данных эманацционного мониторинга. Материалы XX Всероссийской научной конференции “Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту”. Иркутск: Институт земной коры СО РАН; 2022: 261–262.
- [26] Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры Юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии. Геодинамика и тектонофизика. 2016; 7(3):407–434. DOI:10.5800/GT-2016-7-3-0215.

## Information system for complex geophysical research in the Baikal region

L. P. BRAGINSKAYA<sup>1,\*</sup>, A. P. GRIGORYUK<sup>1</sup>, V. V. KOVALEVSKY<sup>1</sup>, I. K. SEMINSKY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 664033, Irkutsk, Russia

\*Corresponding author: Lyudmila P. Braginskaya, e-mail: [ludmila@opg.sscc.ru](mailto:ludmila@opg.sscc.ru)

Received May 15, 2023, revised September 01, 2023, accepted September 06, 2023.

### Abstract

*Purpose.* An information system (IS) is presented for visualization and computational analysis of data from complex geophysical monitoring of the Baikal region (BR), which is carried out by the Institute of the Earth's Crust SB RAS.

*Methodology.* Complex geophysical monitoring of the BR is based on organizing a network of continuous long-term observations of the parameters of geophysical fields in the study area. Monitoring includes registration, as well as further operational processing and interpretation of data leading to predictive estimates. The Institute of the Earth's Crust SB RAS has created a pilot network of complex geophysical monitoring, consisting of three testing sites: "Priolkhonye", "Buguldeika" and "Listvyanka". The IS was built for integration and analysis of data received from geophysical test sites of the BR in order to assess the state of the geological environment and predict the manifestations of hazardous processes.

*Findings.* The IS is built on a client-server architecture. Data storage, processing and analysis is carried out on a server, which can be accessed by users via the Internet using a web browser.

User interaction with the IS is carried out through a control panel, which is a graphical web interface that allows managing functional tasks by selecting monitoring items, types and channels of monitoring, observation time intervals, types of data processing and analysis for signal visualization. It also lists available data preprocessing methods, including filling data gaps, removing outliers, and various filtering methods (linear frequency, Savitzky – Golay, sliding window processing, and others). The set of data analysis methods includes various types of spectral and wavelet analysis, a number of multifractal, entropy and correlation analysis.

*Originality/value.* The IS ensures the efficiency of processing and visualization on a single time grid of seismological, magnetotelluric, emanation, deformometric, geodetic, engineering-geological and hydrogeological monitoring data for a network of observation points in the Baikal region. Thanks to the services provided by the IS, it was possible to increase the efficiency of solving problems of predicting the dynamics of seismic activity in the Baikal region using geophysical methods.

*Keywords:* geophysical monitoring, information system, seismic activity.

*Citation:* Braginskaya L.P., Grigoryuk A.P., Kovalevsky V.V., Seminsky I.K. Information system for complex geophysical research in the Baikal region. Computational Technologies. 2023; 28(6):81–94. DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.008. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The research was supported by Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project No. 075-15-2020-787 "Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation of the Baikal natural territory" and the research project of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project No. 0251-2022-0004.

The leaders and participants of the project including corresponding member of RAS. D.P. Gladkochub, Doctor of Geology and Mineralogy K.Zh. Seminsky, Ph.D. S.A. Bornyakov, Ph.D. A.A. Dobrynina, Ph.D. V.A. Sankov, Doctor of Geology and Mineralogy A.V. Pospeev, Ph.D. A.A. Bobrov and other specialists who provided geophysical monitoring in the Baikal region are greatly appreciated. The authors appreciate the useful advice expressed in creating an information system for complex geophysical monitoring.

## References

1. Levi K.G., Arzhannikova A.V., Buddo V.Yu., Kirillov P.G., Likhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ruzhich V.V., Sankov V.A. Recent geodynamics of the Baikal rift. *Razvedka i Okhrana Nedr.* 1997; (1):10–20. (In Russ.)
2. Logatchev N.A., Florensov N.A. The Baikal system of rift valleys. *Tectonophysics.* 1978; 45(1):1–13. DOI:10.1016/0040-1951(78)90218-4.
3. Logachev N.A. History and geodynamics of the Baikal rift. *Russian Geology and Geophysics.* 2003; 44(5):391–406. (In Russ.)
4. Zemletryaseniya na Baykale [Earthquakes on Lake Baikal]. Available at: [http://irkipedia.ru/content/zemletryaseniya\\_na\\_baykale](http://irkipedia.ru/content/zemletryaseniya_na_baykale) (accessed 01.11.2023). (In Russ.)
5. Melnikova V.I., Gileva N.A., Radziminovich Ya.B., Serezhkina A.I. Kultuuskoe zemletryasenie 27 avgusta 2008 g. s  $M_w = 6.3$ ,  $I_0 = 8-9$  (Yuzhnyy Baikal). *Zemletryaseniya Severnoy Evrazii*, 2008

- god. [Kultuk earthquake August 27, 2008 with  $M_w = 6.3$ ,  $I_0 = 8-9$  (Southern Baikal). Earthquakes of the Northern Eurasia, 2008]. Obninsk: GS RAN; 2014: 386–407. (In Russ.)
6. **Galkina A., Grafeeva N.** Machine learning methods for earthquake prediction: a survey. Proceedings of the Fourth Conference on Software Engineering and Information Management (SEIM 2019). Saint Petersburg, April 2019. CEUR Workshop Proceedings. 2019; (2372):25–32. Available at: [https://ceur-ws.org/Vol-2372/SEIM\\_2019\\_paper\\_31.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-2372/SEIM_2019_paper_31.pdf) (accessed 14.11.2023).
  7. **Yousefzadeha M., Seyyed Ahmad H., Farnaghi M.** Spatiotemporally explicit earthquake prediction using deep neural network. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021: 144. DOI:10.1016/j.soildyn.2021.106663.
  8. **Dal Zilio L., Ampuero J.P.** Earthquake doublet in Turkey and Syria. *Communications Earth & Environment*. 2023; 4(71). DOI:10.1038/s43247-023-00747-z.
  9. Turkey-earthquake: emergency situation report (03.05.2023). Available at: <https://reliefweb.int/report/turkiye/turkey-earthquake-emergency-situation-report-03052023> (accessed 01.11.2023).
  10. **Gulerce Z., Tanvir Shah S., Menekse A., Arda Ozacar A., Kaymakci N., Onder Cetin N.** Probabilistic seismic-hazard assessment for East Anatolian fault zone using planar fault source models. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2017; 107(5):2353–2366. DOI:10.1785/0120170009.
  11. **Martinelli G.** Previous, current, and future trends in research into earthquake precursors in geofluids. *Geosciences*. 2020; 10(5). DOI:10.3390/geosciences10050189.
  12. **Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A.** Early manifestations of short-term precursors in stress-strain state dynamics of southern California. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2021; 57(4):508–519. DOI:10.1134/S1069351321040042.
  13. **Sobisevich L.E., Rogozhin E.A., Sobisevich A.L., Shen To, Liu Jiao.** Instrumental observations of geomagnetic disturbances before seismic events in certain regions of the People’s Republic of China. *Sejsmicheskie Pribory*. 2016; 52(1):39–60. (In Russ.)
  14. **Lyubushin A.A.** Prognostic properties of stochastic variations in geophysical parameters. *Biosfera*. 2014; 6(4):319–338. DOI:10.24855/biosfera.v6i4.177. (In Russ.)
  15. **Khritova M.A.** Informatsionno-analiticheskaya sistema dlya monitoringa zemletryasenyi Pribaykal’ya i Zabaykal’ya: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: spetsial’nost’ 25.00.10 Geofizika, geofizicheskie metody poiskov poleznykh iskopaemykh [Information and analytical system for monitoring earthquakes in the Baikal region and Transbaikalia]. Irkutsk; 2015: 25. (In Russ.)
  16. **Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V.** Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions. *Geophysical Research*. 2020; 21(3):66–91. DOI:10.21455gr2020.3-5. (In Russ.)
  17. **Braginskaya L.P., Grigoruk A.P., Kovalevsky V.V.** Scientific information system “Active seismology” for integrated geophysical studies. *Vestnik KRAUNC. Earth Sciences*. 2015; 1(25):94–98. (In Russ.)
  18. **Makarov M.M., Kycher K.M., Aslamov E.A., Petrov E.A.** The monitoring system of hydrophysical and hydrochemical parameters of lake Baikal. *Journal of Applied and Fundamental Sciences*. 2018; 12(1):120–124. DOI:10.17513/mjpf.12533. Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12533> (accessed 01.11.2023). (In Russ.)
  19. **Bychkov I.V., Gladkochub D.P., Ruzhnikov G.M.** Fundamental’nye osnovy, metody i tekhnologii tsifrovogo monitoringa i prognozirovaniya ekologicheskoy obstanovki Baykal’skoy prirodnoy territorii [Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation of the Baikal natural territory]. Novosibirsk: SO RAN; 2022: 345. DOI:10.53954/9785604788943. Available at: <https://health-family.ru/upload/medialibrary/72b/td6mdxupqwodjfgn48qo3n2ownpvxoxc.pdf> (accessed 13.11.2023). (In Russ.)
  20. **Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., Sankov V.A., Pospeev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminsky I.K., Likhnev A.V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemsky I.K., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Korol S.A.** Integrated monitoring of hazardous geological processes in Pribaikalye: pilot network and first results. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022; 13(5):66–77. DOI:10.5800/GT-2022-13-5-0677. (In Russ.)
  21. **Bornyakov S.A., Miroshnichenko A.I., Vstovsky G.V., Sintsov A.E., Salko D.V.** New approach to strong earthquake prediction in the South Baikal region on the basis of rock deformation

- monitoring data: methodology and results. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022; 13(2):85–88. DOI:10.5800/GT-2022-13-2-0588. (In Russ.)
22. **Dobrynina A.A., Sankov V.A., Bornyakov S.A., Korol S.A., Sankov A.V.** Microseismic noise anomalies before the Kudara earthquake on December 9, 2020 with  $M_w = 5.6$ . *Materialy XX Vserossiyskoy Nauchnoy Konferentsii "Geodinamicheskaya Evolyutsiya Litosfery Central'no-Aziatskogo Podvizhnogo Poyasa: ot Okeana k Kontinentu"*. Irkutsk: Institut Zemnoy Kory SO RAN; 2022: 83–84. (In Russ.)
  23. **Korol S.A., Sankov A.V., Dobrynina A.A., Sankov V.A.** Ambient seismic noise variations before earthquakes in the Baikal rift system. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022; 13(2):0632. DOI:10.5800/GT-2022-13-2s-0632. Available at: <https://www.gt-crust.ru/jour/article/view/1397/0>. (In Russ.)
  24. **Seminsky I.K., Pospeev A.V.** Reflection of strong 2020–2021 Baikal rift earthquakes in the Earth's magnetotelluric field observation data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022; (58):484–492. DOI:10.1134/S1069351322040097. DOI:10.1134/S1069351322040097.
  25. **Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., Mikhailov A.A., Seminsky A.K.** Searches for earthquake precursors in the Baikal region based on complex processing of emanation monitoring data. *Materialy XX Vserossiyskoy Nauchnoy Konferentsii "Geodinamicheskaya Evolyutsiya Litosfery Tsentral'no-Aziatskogo Podvizhnogo Poyasa: ot Okeana k Kontinentu"*. Irkutsk: Institut Zemnoy Kory SO RAN; 2022: 261–262. (In Russ.)
  26. **Lunina O.V.** The digital map of the Pliocene-quaternary crustal faults in the Southern East Siberia and the adjacent Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016; 7(3):407–434. DOI:10.5800/GT-2016-7-3-0215. (In Russ.)