

УДК 004.5, 004.415

## **ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ**

**А. П. Григорюк**<sup>1[0000-0003-0388-2259]</sup>, **Л. П. Брагинская**<sup>1[0000-0002-3469-3373]</sup>,  
**И. К. Семинский**<sup>2[0000-0002-7530-0716]</sup>, **К. Ж. Семинский**<sup>2[0000-0001-7607-0417]</sup>,  
**В. В. Ковалевский**<sup>1[0000-0001-7143-3354]</sup>

<sup>1</sup>*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО  
РАН*

<sup>2</sup>*Институт земной коры СО РАН*

<sup>1</sup>and@opg.sccc.ru, <sup>2</sup>iks@crust.irk.ru

### ***Аннотация***

Представлена цифровая платформа для данных комплексного мониторинга опасных геодинамических, инженерно-геологических и гидрогеологических процессов, протекающих в регионе интенсивного природопользования центральной экологической зоны Байкальской природной территории (ЦЭЗ БПТ). Платформа предназначена для интеграции и анализа данных, поступающих с нескольких полигонов, расположенных в пределах ЦЭЗ БПТ, с целью оценки состояния геологической среды и прогнозирования проявлений опасных процессов. Платформа построена по клиент-серверной архитектуре. Хранение, обработка и анализ данных осуществляются на сервере, к которому пользователи могут обращаться через интернет посредством веб-браузера. Блочная структура сервера позволяет легко расширять набор процедур обработки и анализа данных, а также визуализации результатов. В настоящее время доступны несколько методов фильтрации данных (линейная частотная, Савицкого–Голея и другие), различные методы спектрального и вэйвлет-анализа, мультифрактальный и энтропийный анализ, анализ пространственных данных. Цифровая платформа была опробована на реальных данных.

**Ключевые слова:** *геофизический мониторинг, цифровая платформа, предвестники, сейсмический прогноз, землетрясения.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Землетрясения регулярно приносят бедствия во многих частях мира [1]. Байкальская природная территория (БПТ) является сейсмически активным районом страны в связи с развитием крупной межблоковой границы — Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). В год на территории БРЗ регистрируется 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 15 крупных сейсмособытий, интенсивность которых была выше семи баллов. В 2020–2022 годах наблюдается смещение сейсмоактивности в южную часть БРЗ [2].

Возможные негативные последствия от землетрясений связаны с плотной заселённостью больших городов, расположенных на территории БРЗ, и наличием сложной промышленной инфраструктуры. Кроме того, землетрясения могут провоцировать оползни, обвалы и сели в районах активного природопользования.

Стремясь свести к минимуму ущерб, ученые десятилетиями пытались разработать методы прогнозирования землетрясений [3]. Однако прогнозирование землетрясений остается сложной задачей, т. к. процесс их подготовки еще недостаточно глубоко изучен. Прогнозные исследования обычно сосредоточены на эмпирическом анализе с использованием двух основных подходов [4]. Первый подход основан на выявлении отчетливых предвестников землетрясений. При втором подходе идентифицируются геофизические тренды или закономерности сейсмического процесса, предшествующие сильному землетрясению. Методы предвестников в основном используются для краткосрочного предсказания землетрясений; трендовые методы более полезны для прогнозирования промежуточных (1–10 лет) и долгосрочных (10–100 лет) событий [5].

В настоящей работе рассматривается цифровая платформа (ЦП), которая позволяет на базе цифровой обработки данных комплексного мониторинга реализовывать оба подхода.

## **СТРАТЕГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БПТ**

Начиная с 1970-х годов, разрабатывалась концепция подхода к решению проблемы прогноза землетрясений и организации многодисциплинарного мониторинга БПТ [6–10]. К концу прошлого века Южно-Байкальский геодинамический полигон включал электромагнитный полигон (пос. Энхалук), вибрационный полигон (п. Бабушкин, Бурятия), комплексную обсерваторию «Талая», сеть тектономагнитных наблюдений в дельте р. Селенга, непосредственные измерения деформаций на Приморском разломе в Листвянке, а также сеть сейсмологических станций.

Исследования были направлены на анализ современных движений земной коры в пределах Байкальской рифтовой зоны и выработку стратегии прогноза сейсмической активности. За эти годы были получены фундаментальные знания о глубинном строении БРЗ, закономерностях развития сейсмических процессов, связи механизмов землетрясений с региональной сейсмичностью. В 1992–1993 гг. группой специалистов из различных институтов СО РАН был установлен факт смены преобладающих растягивающих напряжений в БРЗ на сжимающие. В этот промежуток времени (полтора года) сменился преобладающий тип землетрясений и уменьшилась сейсмическая активность. Размеры области, в которой произошла смена знака деформации, проявилась в наличии крупной тектономагнитной аномалии. Опыт данного открытия выявил одну из причин, по которой комплексы предвестников могут изменяться в течение времени в пределах одной очаговой зоны, а также показал важность комплексирования различных видов информации, включая численное моделирование напряженного состояния. Процесс подготовки землетрясений, проявляющийся в вариациях геофизических полей разной природы, охватывает более крупные объемы, чем зоны разрушений. Одним из факторов предразрушения является трещинообразование, которое проявляется в большинстве физических полей: сейсмических, электрических, гравитационных, влияет на гидрологические и геохимические показатели. Исходя из новых знаний о региональной сейсмичности БПТ, на смену принятой ранее концепции прогноза, основанной на поиске универсальных предвестников, в последние десятилетия упор делается на поиск комплекса предвестников для каждой из очаговых зон.

## **СЕТЬ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БПТ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ**

Одной из важнейших задач мониторинга и сейсмического прогнозирования БПТ последних лет являются организация систематических наблюдений, а также получение и численный анализ данных комплексного геофизического мониторинга.

Институтом земной коры СО РАН создана пилотная сеть комплексного геофизического мониторинга, состоящая из трех полигонов: «Приольхонье», «Бугульдейка» и «Листвянка». 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 и др. Приборы устанавливаются на поверхности, 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 [11].

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), которые ощущались в крупных городах Прибайкалья с интенсивностью 5 баллов.

На основе анализа сейсмического режима, проведенного в прошлые годы, установлены пространственно-временные закономерности проявления сейсмической активности, которые легли в основу прогнозных построений. Составлены карты долгосрочного прогноза, установлены средние периоды повторяемости землетрясений.

На основе анализа данных комплексного мониторинга, который был проведен специалистами ИЗК СО РАН, был предложен следующий сценарий активизации развития Байкальской рифтовой зоны в период 2020–2021 гг. Процесс был «запущен» Быстринским землетрясением, в результате которого южная часть Сибирского блока сместилась в СЗ направлении. Это привело к накоплению избыточных напряжений в его тыловой части и, как следствие, их разрядке в режиме растяжения посредством Кударинского землетрясения. «Высвобождение» СЗ части Забайкальского блока привело к его смещению на восток и инициированию Хубсугульского землетрясения 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.

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

### **АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ**

Цифровая платформа (ЦП) предназначена для интеграции и анализа данных, поступающих с нескольких полигонов, расположенных в пределах ЦЭЗ БПТ, с целью выявления аномалий и трендов во временных рядах, которые могут интерпретироваться как предвестники землетрясений.

ЦП построена по клиент-серверной архитектуре, её структурная схема приведена на рисунке 1. Предполагается, что Коллектор данных должен периодически подгружать данные с пунктов мониторинга, куда они поступают в реальном времени непосредственно с датчиков. Далее данные приводятся к единому формату и помещаются в Локальное хранилище. Веб-приложение обеспечивает взаимодействие с пользователями Рабочих станций. Пользователи через интерфейс ЦП в веб-браузере (рисунок 2) формируют запросы к серверу, выбирая интересующий их интервал времени, пункты мониторинга, виды мониторинга и каналы,

виды обработки и анализа данных. В соответствии с запросом серверный сценарий извлекает нужные данные из Локального хранилища, производит их анализ и визуализацию и отправляет результат пользователю.

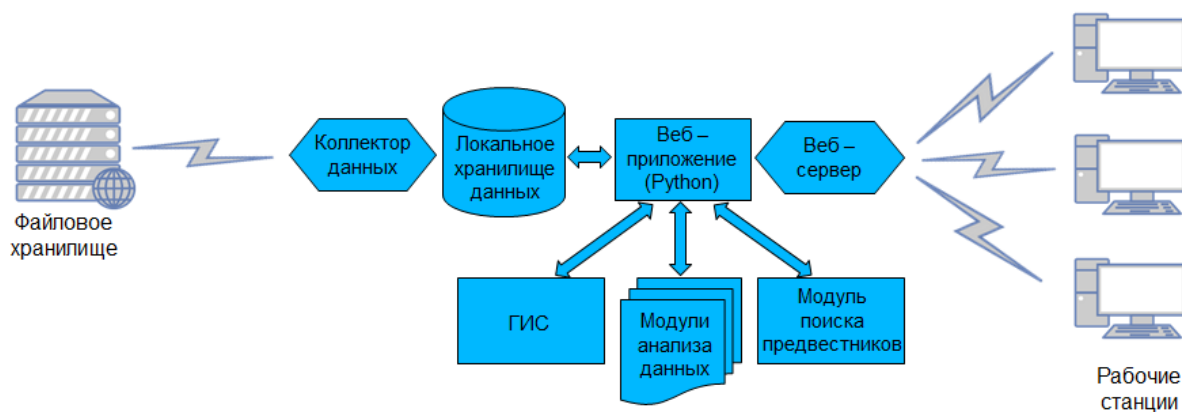


Рисунок 1. Структурная схема ЦП

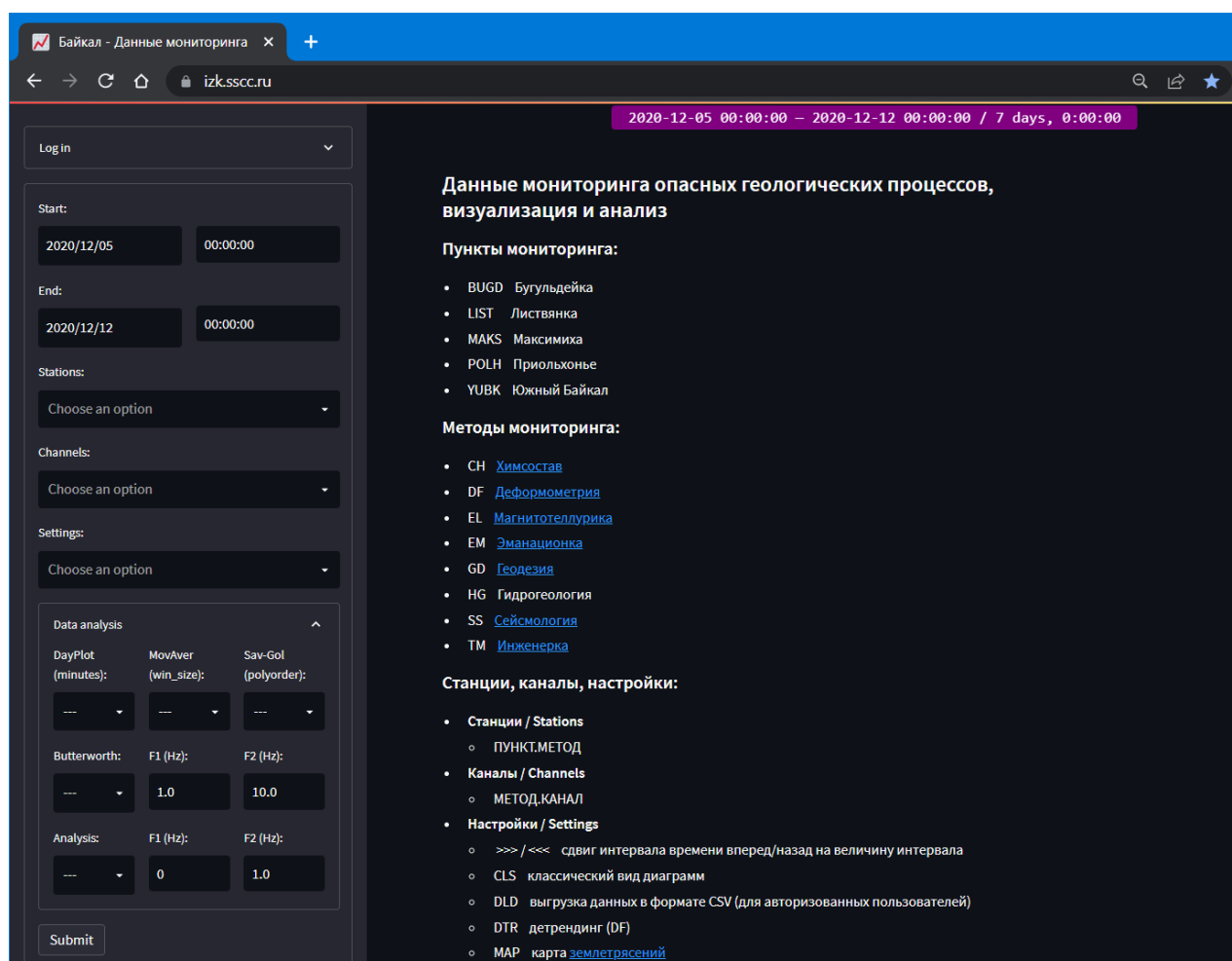


Рисунок 2. Пользовательский интерфейс ЦП. Стартовая страница

Анализ данных осуществляется Модулями анализа данных, набор которых может расширяться. В настоящее время доступны несколько методов фильтрации данных (линейная частотная, Савицкого–Голея и другие), различные методы спектрального и вэйвлет-анализа, мультифрактальный и энтропийный анализ, пространственный анализ данных. Модуль поиска предвестников в настоящее время разрабатывается, в нем планируется использовать как аналитические методы, так и методы машинного обучения.

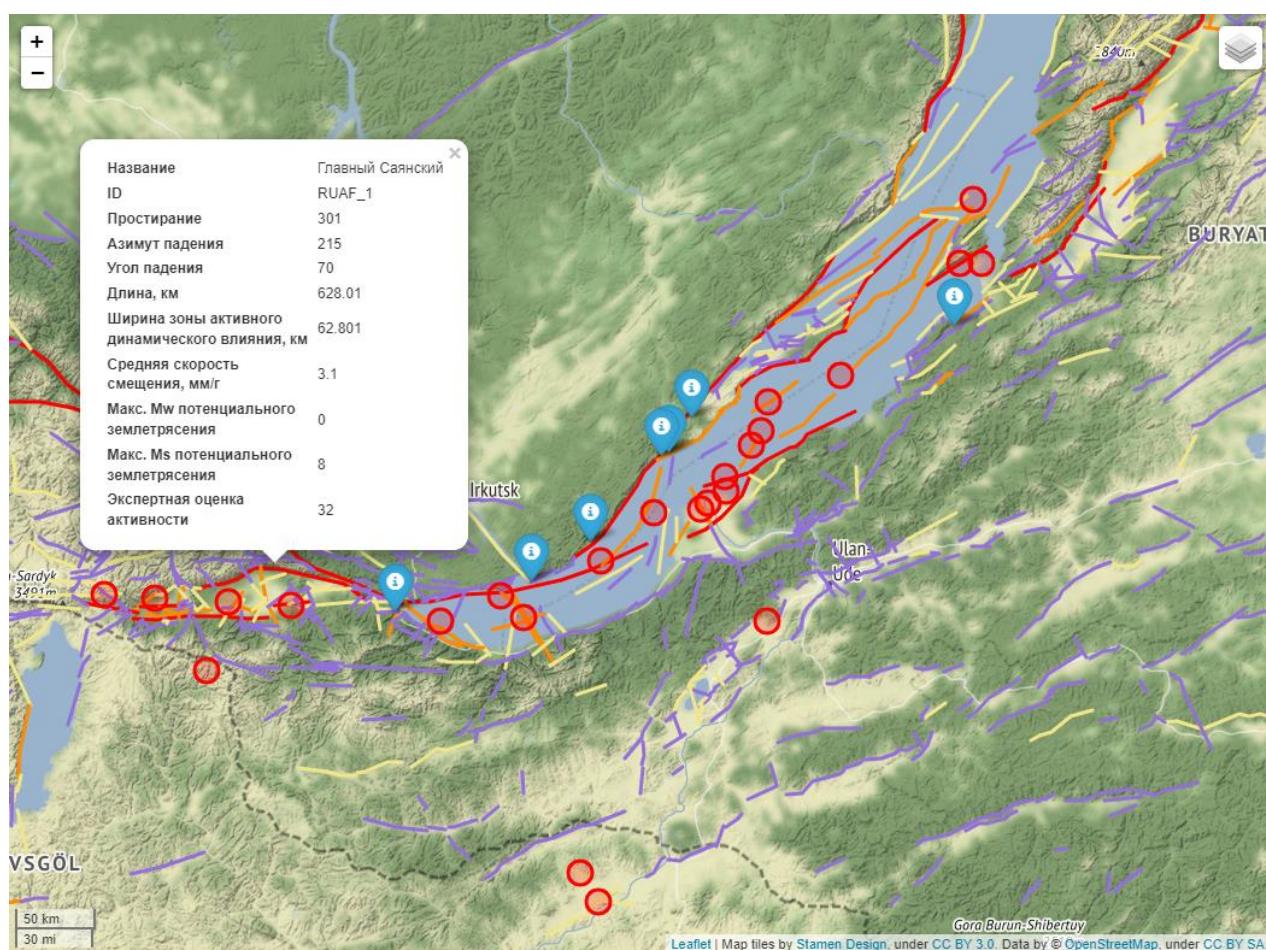


Рисунок 3. Интерфейс ЦП. ГИС

ГИС предназначена для построения интерактивных карт, которые могут включать несколько слоев: землетрясения за выбранный интервал времени [12], геофизические разломы и исторические землетрясения [13], тепловые карты и т. д. Таким образом, можно получать необходимую информацию о предшествующих или последующих аномалиях временных рядов сейсмических событий, а также характеристики активных разломов в районе очага. На рисунке 3 приведен

пример карты с обозначенными пунктами мониторинга, историческими землетрясениями и геологическими разломами, по одному из которых выведена информация во всплывающем окне.

При создании ЦП использовалось только свободно распространяемое программное обеспечение. Бэкенд сервера написан на языке Python с использованием следующих программных библиотек:

- Streamlit — веб-фреймворк;
- Matplotlib — построение 2D и 3D диаграмм;
- NumPy — поддержка многомерных массивов и матриц;
- Pandas, SciPy — научные и инженерные расчеты;
- ObsPy — фреймворк для работы с сейсмологическими данными;
- Folium GIS — ГИС, использующая карты OpenStreetMap.

В настоящее время ЦП функционирует в тестовом режиме и доступна в интернете по адресу <https://izk.sccc.ru>.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦП**

Тестовые испытания ЦП начались в феврале 2022 года. Благодаря возможности ЦП 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 данных можно отнести выявление краткосрочных предвестников Кударинского землетрясения (9.12.2020, Mw = 5.5) в данных электротеллурического мониторинга полигона Бугульдейка (ряд наблюдений вертикальной компоненты электротеллурического поля — Ez для линии 11 м).

На рис. 4 представлены визуализированные цифровой платформой данные электротеллурического мониторинга в период подготовки Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 года.



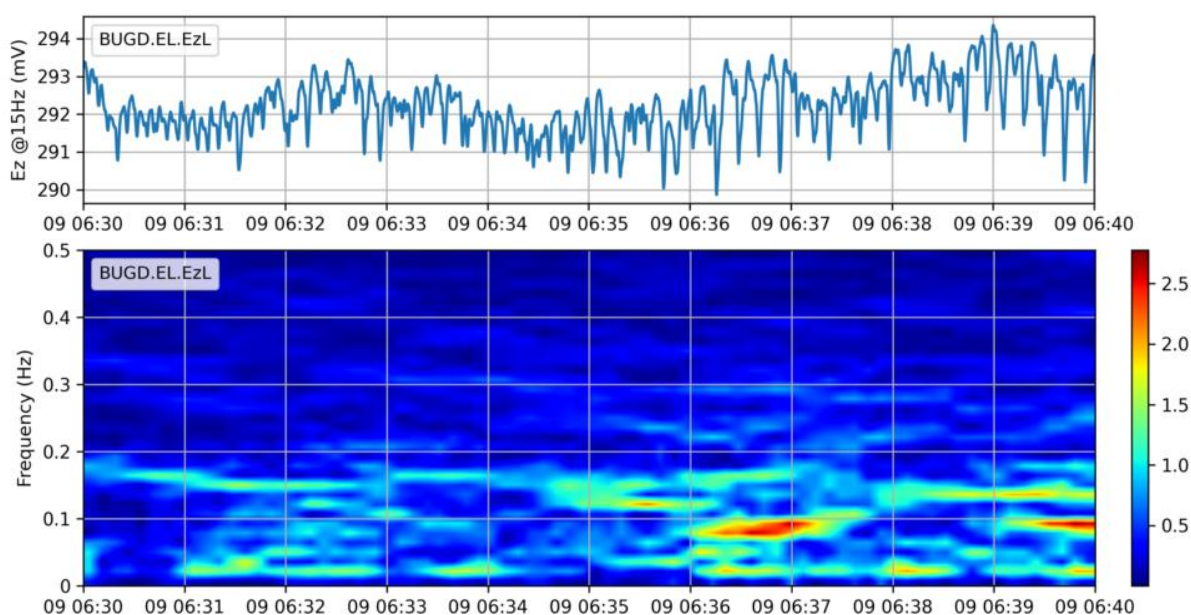


Рисунок 4. Интерфейс ЦП. Ряд наблюдений Ez и спектрограмма

На спектрограмме Ez отчетливо выделяется изменение спектра сигнала примерно за сутки до землетрясения. Характер флуктуаций ряда Ez 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 увеличивалась, а частота уменьшилась до 0.03 Гц. Важно отметить, что подобные флуктуации не наблюдаются за весь период магнитотеллурических наблюдений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная ЦП существенно повышает эффективность исследований с использованием данных комплексного мониторинга. Комплексирование различных методов геофизического мониторинга повышает достоверность прогноза сейсмической активности БПТ.

Дальнейшее развитие ЦП авторы связывают с формализацией экспертных правил и машинным обучением на многолетних рядах, что позволит автоматизировать поиск трендов и аномалий временных рядов данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sudmeier-Rieux K., Jaboyedoff M., Breguet A., Dubois J.* The 2005 Pakistan earthquake revisited: methods for integrated landslide assessment // *Mt. Res. Dev.* 2011. Vol. 31, No. 2. P. 112–120.

2. Землетрясения на Байкале.

URL: [http://irkipedia.ru/content/zemletryaseniya\\_na\\_baykale](http://irkipedia.ru/content/zemletryaseniya_na_baykale)

3. *Yong Hwa Oh, Kim G.* A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor // *Sci. Rep.* 2015, No. 5. P. 13084, 10.1038/srep13084

4. Panel on Earthquake Prediction of the Committee on Seismology [C.R Allen, chairman]. *Predicting Earthquakes: A Scientific and Technical Evaluation – with Implications for Society.* National Academy Sciences, Washington, D.C. (July 1976).

5. *Masashi Hayakawa* Fundamentals of Earthquake Prediction 9781118770375, John Wiley and Sons, Singapore (2015).

6. *Levi K.G., Arzhannikova A.V., Buddo V.Yu., Kirillov P.G., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ruzhich V.V., San'kov V.A.,* Recent geodynamics of the Baikal rift // *Razvedka i okhrana nedr.* 1997. No. 1. P. 10–20 (in Russian).

7. *Logachev N.A.,* History and geodynamics of the Baikal rift // *Russian Geology and Geophysics.* 2003. Vol. 44, No. 5. P. 391–406.

8. *Logachev N.A., Florensov N.A.,* The Baikal system of rift basins. In: *The role of rifting in the geological history of the Earth.* Novosibirsk: Nauka, 1977. P. 19–29 (in Russian).

9. *Gol'din S.V., Dyadkov P.G., and Dashevskii Yu.A.* The South Baikal geodynamic testing ground: strategy of earthquake prediction // *Russian Geology and Geophysics,* 2001. Vol. 42, No. 10. P. 1484–1497.

10. *Dyadkov P. G., Melnikova V.I., Nazarov V.I., et al.* The development of seismotectonic and earth quake preparation processes in central. Part of the Baikal Riftzone // *Russian Geology and Geophysics.* 1999. Vol. 40, No. 3. P. 373–386.

11. *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., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А.* Ком-

плексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. Т. 2022, № 13(5): 0677. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0677>

12. Каталог землетрясений Байкальского филиала ЕГС РАН.

URL: <http://seis-bykl.ru/>

13. 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. Т. 7, № 3. С. 407–434. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>

---

## A DIGITAL PLATFORM FOR INTEGRATION AND ANALYSIS OF GEOPHYSICAL MONITORING DATA FROM THE BAIKAL NATURAL ZONE

Andrey Grigoryuk<sup>1</sup>[0000-0003-0388-2259], Ludmila Braginskaya<sup>1</sup>[0000-0002-3469-3373],  
Igor Seminsky<sup>2</sup>[0000-0002-7530-0716], Konstantin Seminsky<sup>2</sup>[0000-0001-7607-0417],  
Valery Kovalevsky<sup>1</sup>[0000-0001-7143-3354]

<sup>1</sup>*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB  
RAS, 6, Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090*

<sup>2</sup>*Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128 Lermontova str, Irkutsk, 664033*

<sup>1</sup>and@opg.sccc.ru, <sup>2</sup>iks@crust.irk.ru

### **Abstract**

This paper presents a digital platform for complex monitoring data of dangerous geodynamic, engineering-geological and hydrogeological processes occurring in the region of intensive nature management of the central ecological zone of the Baikal natural territory (CEZ BNT). The platform is intended for integration and analysis of data coming from several polygons located within the CEZ BPT in order to assess the state of the geological environment and forecasting of hazardous processes manifestation.

The platform is built on a client-server architecture. Storage, processing and analysis of data is carried out on the server, which users can access via the Internet using a web browser. Several data filtering methods (linear frequency, Savitsky-Goley and others), various methods of spectral and wavelet analysis, multifractal and entropy

---

analysis, and spatial data analysis are currently available. The digital platform has been tested on real data.

**Keywords:** *geophysical monitoring, digital platform, precursors, seismic forecast, earthquakes.*

## REFERENCES

1. *Sudmeier-Rieux K., Jaboyedoff M., Breguet A., Dubois J.* The 2005 Pakistan earthquake revisited: methods for integrated landslide assessment // *Mt. Res. Dev.* 2011. Vol. 31, No. 2. P. 112–120.
2. Earthquakes on Baikal.  
URL: [http://irkipedia.ru/content/zemletryaseniya\\_na\\_baykale](http://irkipedia.ru/content/zemletryaseniya_na_baykale)
3. *Yong Hwa Oh, Kim G.* A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor // *Sci. Rep.* 2015, No. 5. P. 13084, 10.1038/srep13084
4. Panel on Earthquake Prediction of the Committee on Seismology [C.R Allen, chairman]. *Predicting Earthquakes: A Scientific and Technical Evaluation – with Implications for Society.* National Academy Sciences, Washington, D.C. (July 1976).
5. *Masashi Hayakawa* *Fundamentals of Earthquake Prediction* 9781118770375, John Wiley and Sons, Singapore (2015).
6. *Levi K.G., Arzhannikova A.V., Buddo V.Yu., Kirillov P.G., Likhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ruzhich V.V., San'kov V.A.,* Recent geodynamics of the Baikal rift // *Razvedka i okhrana nedr.* 1997. No. 1. P. 10–20 (in Russian).
7. *Logachev N.A.,* History and geodynamics of the Baikal rift // *Russian Geology and Geophysics.* 2003. Vol. 44, No. 5. P. 391–406.
8. *Logachev N.A., Florensov N.A.,* The Baikal system of rift basins. In: *The role of rifting in the geological history of the Earth.* Novosibirsk: Nauka, 1977. P. 19–29 (in Russian).
9. *Gol'din S.V., Dyadkov P.G., and Dashevskii Yu.A.* The South Baikal geodynamic testing ground: strategy of earthquake prediction // *Russian Geology and Geophysics,* 2001. Vol. 42, No. 10. P. 1484–1497.
10. *Dyadkov P.G., Melnikova V.I., Nazarov V.I., et al.* The development of seismotectonic and earth quake preparation processes in central. Part of the Baikal Riftzone // *Russian Geology and Geophysics.* 1999. Vol. 40, No. 3. P. 373–386.

11. Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Borneyakov S.A., Sankov V.A., Pospeev A.V., Ras-skazov 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. Comprehensive monitoring of dangerous geological processes in the Baikal region: organization of a pilot network and first results. *Geodynamics and tectonophysics*. 2022;13(5): 0677. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0677>

12. Earthquake catalog of Baikal Branch UGS RAS. URL: <http://seis-bykl.ru/>

13. 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. V. 7 (3). P. 407–434), <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>

---

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**ГРИГОРЮК Андрей Павлович**, научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск.

**Andrey GRIGORYUK**, Researcher of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk.

e-mail: [and@opg.sccc.ru](mailto:and@opg.sccc.ru)

ORCID ID: 0000-0003-0388-2259



**БРАГИНСКАЯ Людмила Петровна**, ведущий программист Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск.

**Lyudmila BRAGINSKAYA**, Lead Programmer of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk.

e-mail: [ludmila@opg.sccc.ru](mailto:ludmila@opg.sccc.ru)

ORCID ID: 0000-0002-3469-3373

---



**СЕМИНСКИЙ Игорь Константинович**, кандидат геолого-минералогических наук, начальник центра комплексного мониторинга опасных геологических процессов Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

**Igor SEMINSKIY**, PhD, Head of the Center for comprehensive monitoring of hazardous geological processes, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: [iks@crust.irk.ru](mailto:iks@crust.irk.ru)

ORCID ID: 0000-0002-7530-0716



**СЕМИНСКИЙ Константин Жанович**, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией тектонофизики Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

**Konstantin SEMINSKIY**, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory of Tectonophysics, Institute of Terrestrial Core of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: [seminsky@crust.irk.ru](mailto:seminsky@crust.irk.ru)

ORCID ID: 0000-0001-7607-0417



**КОВАЛЕВСКИЙ Валерий Викторович**, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск.

**Valeriy KOVALEVSKIY**, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Science of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk.

e-mail: [kovalevsky@sscc.ru](mailto:kovalevsky@sscc.ru)

ORCID ID: 0000-0001-7143-3354

*Материал поступил в редакцию 25 августа 2022 года*