



Геоинформационная система оценки природно-техногенной сейсмичности месторождений полезных ископаемых

О.А. Капустина¹ ✉, О.В. Антонова¹

¹ Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Оренбург, Россия
✉ onical@yandex.ru

цитирование

Капустина О.А., Антонова О.В. Геоинформационная система оценки природно-техногенной сейсмичности месторождений полезных ископаемых // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 110–127. DOI:10.30533/GiA-2026-008.

ключевые слова

архитектура геоинформационной системы, методология построения геоинформационной системы, месторождение, полезные ископаемые, природно-техногенная сейсмичность

аннотация

В настоящей работе предлагается методология построения специализированной геоинформационной системы (ГИС) для анализа пространственно-временной информации о фиксируемых явлениях сейсмичности в условиях техногенного воздействия на платформенных территориях с учетом региональных особенностей. Выделены основные компоненты методологии построения ГИС в виде базы источников, эмпирической, теоретической и инструментальной баз. Определен минимальный набор классов методов построения ГИС оценки природно-техногенной сейсмичности в районах добычи полезных ископаемых, который включает методы машинного обучения и многопараметрического анализа пространственной и пространственно-временной информации, а также позволяет оценивать сейсмический режим техноприродной системы и степень влияния параметров разработки месторождений на сейсмичность. Наиболее важным результатом настоящего исследования является разработанная функциональная структура ГИС оценки природно-техногенной сейсмичности, основными обеспечивающими подсистемами которой выступают: аппаратное обеспечение в виде сейсмологической сети «Нефтегаз-сейсмика»; математическое и информационное обеспечение, включающее базу геоданных объектно-реляционной системы управления базами данных PostgreSQL с геопространственным расширением PostGIS; интерактивное программное обеспечение, построенное по принципам объектно ориентированного программирования на языке Python, взаимодействующее с JavaScript

через QWebChannel и картографической визуализацией через компоненты на базе Folium / Leaflet.js. Основные модули ГИС для ввода, статистического анализа и визуализации данных протестированы на примере оценки общей сейсмичности Оренбургской области.

1 Введение

Необходимость ведения мониторинга геодинамической обстановки при освоении месторождений полезных ископаемых, согласно Федеральному закону РФ «О недрах»¹, способствует активному расширению сетей сейсмологических станций не только в сейсмоактивных, но и в малосейсмичных районах, например в Оренбургской области. Это приводит к повышению скорости поступления пространственных и пространственно-временных данных, в том числе об объектах и процессах добывающей промышленности на разрабатываемых месторождениях платформенных территорий.

По результатам мониторинга, согласно приказу Минприроды России «Об утверждении Положения о функциональной подсистеме мониторинга состояния недр единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций»², требуется проводить оценку состояния недр и прогнозирование их изменений под влиянием природных и техногенных факторов. Однако получаемые эмпирические пространственные данные разнородны, разнотипны и разноформатны, что затрудняет их анализ. В связи с этим требуется не только применять геоинформационные технологии с использованием геоинформационных систем (ГИС) общего назначения для выявления закономерностей и зависимостей между процессами разработки месторождений полезных ископаемых на платформенных территориях и развитием природно-техногенной сейсмичности на таких территориях, но и создавать специализированные ГИС.

В условиях перехода от зарубежных программных продуктов к программному обеспечению с открытым кодом наиболее применима ГИС общего назначения QGIS и (или) специальные веб-ГИС по сейсмологии, анализ состояния которых проведен Е.С. Подольской и ее соавторами [1]. В настоящее время работы по созданию и применению геоинформационных систем и технологий, позволяющих организовать сбор, хранение, обработку и анализ пространственно-временной информации о геодинамических и сейсмических процессах, активно ведут многие российские исследователи: В.Н. Опарин, В.В. Адушкин, В.Ф. Юшкин, В.П. Потапов и др. [2, 3]; В.Г. Гитис, А.Б. Дерендяев, К.Н. Петров, М.А. Витушко [4]; А.А. Какоурова, А.В. Ключевский и др. [5]; С.В. Корнилков, П.А. Рыбников, А.С. Ведерников, А.А. Панжин [6]; А.В. Михеева, П.Г. Дядьков, А.Г. Марчук [7]; А.С. Кануков, Д.А. Мельков [8]; Т.С. Блинова, В.В. Удоратин, Р.А. Дягилев и др. [9]; М.Ю. Нестеренко и др. [10]; Ю.А. Калуж, К.О.С. Кужугет, С.А. Чупикова, С.С.С. Монгуш [11] и др. В первую очередь усилия ученых направлены на решение практической задачи по созданию ГИС для мониторинга сейсмической активности и анализа сейсмоактивных территорий с ярко выраженной природной сейсмичностью. Такие системы являются малоприспособленными для анализа геодинамической, сейсмической информации и данных

1 О недрах: Федеральный закон Российской Федерации от 21 февраля 1992 г. № 2395-1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102014778> (дата обращения: 20.11.2025).

2 Об утверждении Положения о функциональной подсистеме мониторинга состояния недр единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 15 августа 2023 г. № 520. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202312060010> (дата обращения: 20.11.2025).

об эксплуатации месторождений полезных ископаемых в отношении мало-сейсмичных платформенных территорий.

Зарубежное научное сообщество не менее активно использует готовые решения ГИС и разрабатывает интеллектуальные подсистемы ГИС на основе машинного обучения для обработки и анализа пространственно-временной информации о природных и техногенных сейсмических событиях. Индийские ученые³ [12, 13] ведут геоаналитические работы по оценке природной и техногенной сейсмичности на основе ГИС и машинного обучения. Китайские исследователи решают задачи пространственно-временного анализа сейсмичности и оценки сейсмической опасности методами кластерного анализа [14, 15], применяют сверточные нейронные сети для классификации и идентификации локальных природных и техногенных сейсмических событий [16]. Коллектив авторов из Малайзии, Индонезии и Объединенных Арабских Эмиратов провел оценку надежности различных методов искусственного интеллекта для прогнозирования природной сейсмичности на примере Малайзии [17], в результате чего была выделена простая модель двухслойной нейронной сети с пятью нейронами в каждом слое, обеспечивающая приемлемый уровень точности для прогнозирования. Представители американского научного сообщества также применяют методы машинного обучения для решения задач по прогнозированию техногенной сейсмичности [18].

В европейских странах при решении задач мониторинга природно-техногенной сейсмичности и управления ею [19, 20] одной из причин, вызывающих проблемы ее распознавания, считают высокую разнородность данных, что затрудняет применение одного и того же подхода к каждому исследуемому случаю. Отмечается необходимость систематизации и анализа геоинформации для изучения региональных и локальных геодинамических процессов [21].

В связи со всем вышесказанным актуальной можно считать разработку на базе программного обеспечения с открытым кодом ГИС, включающей интеллектуальные подсистемы на основе машинного обучения для обработки и анализа пространственно-временной информации о природных и техногенных сейсмических событиях.

Цель настоящей работы — спроектировать и разработать инструмент, позволяющий организовать сбор, хранение, обработку и анализ пространственно-временной информации (в том числе с применением машинного обучения) о геодинамических и сейсмических процессах, возникающих в результате антропогенной деятельности на малосейсмичных территориях.

2 Материалы и методы

В основе построения ГИС оценки природно-техногенной сейсмичности месторождений полезных ископаемых лежит подход интеграции геоданных и инструментов их анализа в рамках единого информационного пространства сети поставщиков и потребителей информации [22]. Методология построения ГИС включает совокупность основных компонентов: базы источников, эмпирической, теоретической и инструментальной баз, содержание которых представлено на рис. 1.

Применяемые методы можно разделить на следующие классы:

- 1) сбора и обработки исходной пространственно-временной информации (методы определения чувствительности сейсмологической сети на основе установления представительности регионального каталога сейсмических событий, методы первичного анализа геоданных, методы

3 Seshagiri Rao V., Kumar B. Computer Vision and Geoanalytics // National Symposium on “Geospatial Technology: Journey from Data to Intelligence” and Annual Convention of ISRS and ISG: Abstracts. Hyderabad: HICC, 2022. P. 85.

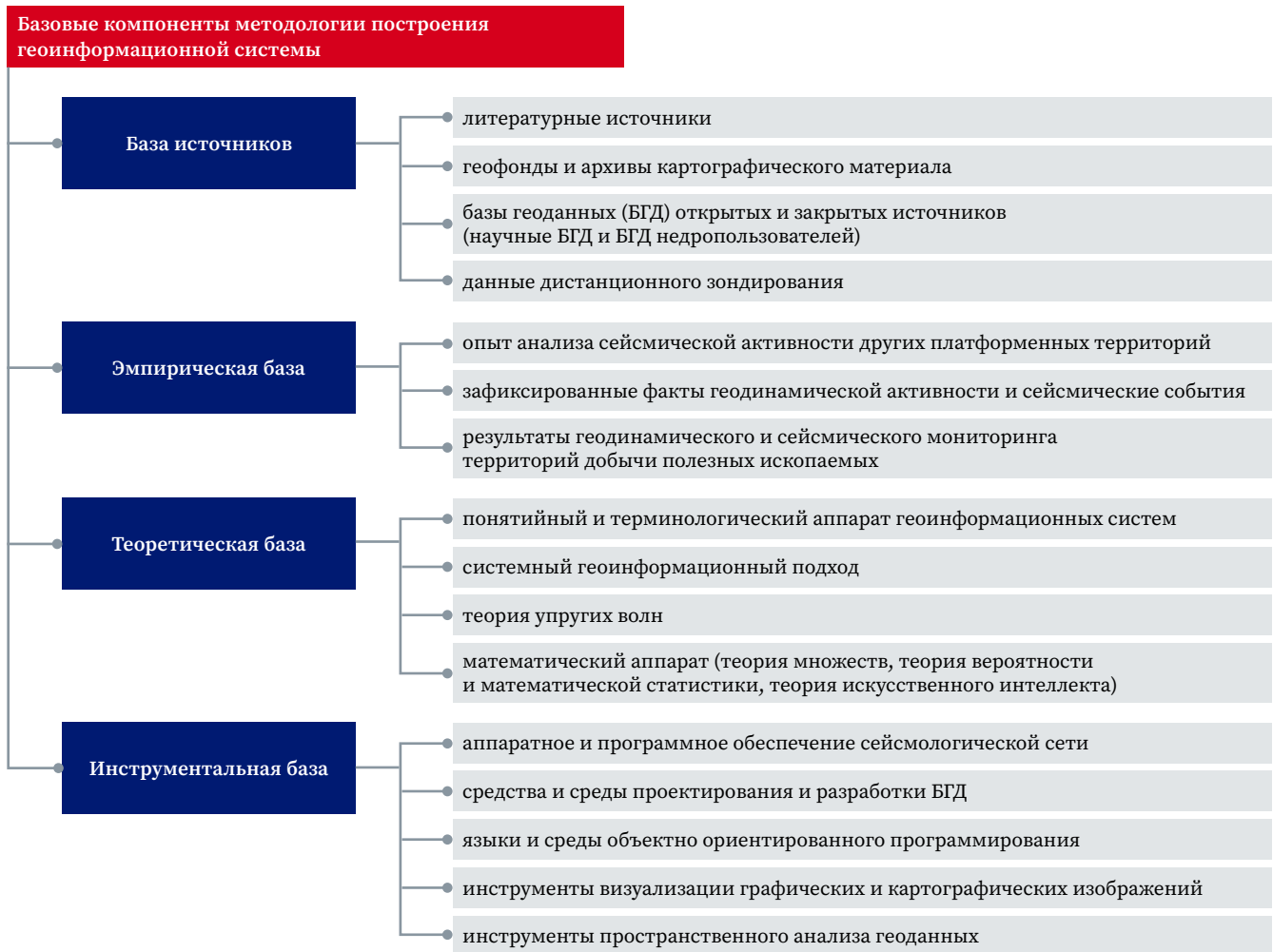


Рис. 1 
Базовые компоненты методологии разработки ГИС
Fig. 1
The basic components of the GIS development methodology

оценки качества исходной геопространственной информации), которые позволяют выявлять аномалии в значениях координат сейсмических событий и (или) их отсутствие, пропуски по значениям и дублирующие записи основных характеристик сейсмических событий и параметров разработки месторождений;

- анализа пространственно-временной информации для оценки сейсмического режима (классические методы оценки сейсмичности района с учетом ряда параметров [изменения во времени сейсмической активности и наклона графика повторяемости], определяющего зависимость между магнитудой и общим числом землетрясений [закон Гутенберга — Рихтера]; методы теории вероятности и математической статистики; методы машинного обучения, в частности методы кластерного анализа К-ближайших соседей и методы оптимального определения кластеров «локтя» и «силуэта»);
- геопространственного анализа (метод определения плотности сейсмических событий и методы буферизации);
- пространственной визуализации (картографический и графический методы);
- проектирования и построения современных ГИС (метод разработки веб-ГИС на основе клиент-серверной архитектуры и метод разработки ГИС на основе готовых решений).

Для проектирования ГИС оценки сейсмичности месторождений полезных ископаемых применяется объектно ориентированный подход с унифицированным языком моделирования UML, применяемый для любых информационных систем. В качестве средств разработки используется среда разработки Jupyter Notebook с языком программирования Python и объектно-реляционной

системы управления базами данных (СУБД) PostgreSQL, которая поддерживает расширяемость и соответствие стандартам SQL с геопространственным расширением PostGIS. Совместное использование этих инструментов обеспечивает хранение, анализ пространственных и пространственно-временных данных и управление ими, предоставляя возможности поддержки пространственных типов данных (точки, линии, полигоны), пространственных функций и операторов для выполнения сложных геометрических операций и пространственных индексов для ускорения выполнения запросов.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Архитектура ГИС оценки сейсмичности месторождений

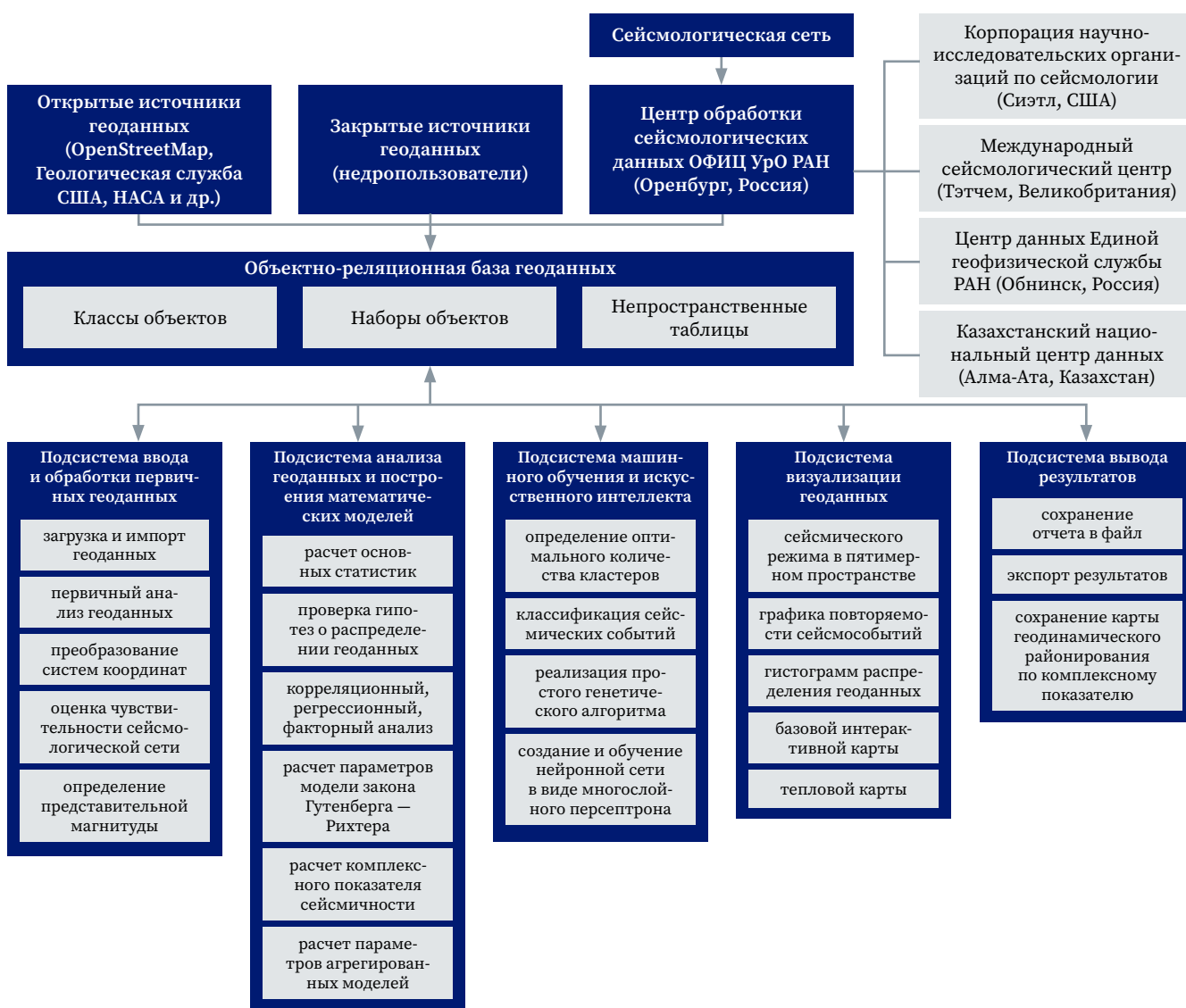
Рис. 2 ✓

Структура ГИС

Fig. 2

Structure of the GIS

С использованием современных средств проектирования и разработки информационных систем разработана структура ГИС оценки сейсмического режима эксплуатации месторождений полезных ископаемых Оренбургской области (рис. 2).



Рассмотрим основные структурные компоненты ГИС.

1. Подсистема аппаратного обеспечения ГИС

Подсистема аппаратного обеспечения ГИС в виде сейсмологической сети «Нефтегаз-сейсмика» состоит из 12 стационарных и 2 передвижных станций, 8 из которых подробно описаны в ежегоднике «Землетрясения России» [23]. В состав сети входят: аналоговые датчики в виде магнитоэлектрических сейсмоприемников СМ-ЗКВ на шести сейсмостанциях (Оренбург, Южный Урал, Донецкое, Троицкое, Лебяжка, Байтуган-3); электронно-молекулярные сейсмометры СМЕ-4311 на трех станциях (Байтуган-1, Байтуган-2, Олимпийское), для каждого из которых установлены регистраторы SDAS, UGRA или Байкал-8, выполняющие функции оцифровки аналогового сигнала, поступающего на аналоговые входы регистратора, и накопления и передачи данных в виде цифрового сигнала. Сейсмостанции Толкаевка и Моховое снабжены одной из самых распространенных моделей сейсмических датчиков (трехкомпонентным широкополосным велосиметром со встроенным регистратором CMG-6TD производства Guralp Systems), которые подходят для работы в полевых условиях в местах со средним уровнем шума как при временных, так и при постоянных установках [24].

2. Подсистема обработки сейсмологических данных

Подсистема обработки сейсмологических данных расположена в центре обработки сейсмологических данных отдела геоэкологии Оренбургского федерального исследовательского центра УрО РАН (ОФИЦ УрО РАН). Основные функции этой подсистемы заключаются:

- в обработке сейсмограмм, полученных по результатам функционирования сейсмологической сети средствами программного комплекса WSG, и ведении общего каталога всех регистрируемых событий (местных, эпицентры которых находятся в Оренбургской области, и региональных, происходящих в соседних областях);
- во взаимодействии с сейсмологическими центрами данных: Корпорацией научно-исследовательских организаций по сейсмологии (*англ.* Incorporated Research Institutions for Seismology) (Сиэтл, США); Единой геофизической службой Российской академии наук (Обнинск, Россия), куда транслируются данные станции федерального значения ORR и ежегодно пересылаются обобщенные сведения по зарегистрированным событиям; Международным сейсмологическим центром (*англ.* International Seismological Centre) (Тэтчем, Великобритания); Казахстанским национальным центром данных (КНЦД) (Алма-Ата, Казахстан), а также во взаимодействии с базами геоданных недропользователей Оренбургской области по поставке данных о параметрах разработки месторождений полезных ископаемых, с открытыми источниками географической, геологической, гидрологической информации OpenStreetMap, Геологической службой США (*англ.* United States Geological Survey), Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) и другими организациями.

3. Объектно-реляционная база геоданных

Объектно-реляционная база геоданных⁴, концептуальная модель которой представлена на рис. 3, поддерживает такие функции и операции, как хранение различных типов данных, включая числовые, строковые, даты и геометрические типы данных (точки, линии и полигоны); хранение имени каждого объекта

⁴ Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622328 Российская Федерация. База геоданных для оценки геодинамического состояния месторождений полезных ископаемых Оренбургской области: заявл. 12.05.2025; опубл. 28.05.2025 / М.Ю. Нестеренко, О.А. Капустина, О.В. Антонова; заявитель Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Научно-производственное предприятие «Экотехнологии».



Рис. 3 
Концептуальная модель базы геоданных
Fig. 3
Conceptual model of a geodata base

Таблица 1 
Сущности, атрибуты и связи базы геоданных
Table 1
Entities, attributes and relationships of the geodata database

в базе геоданных (если оно присутствуют у объекта) и координат в отдельном атрибуте; хранение атрибутов, связанных с геометрическими объектами; импорт и экспорт данных в форматах Shapefile, GeoJSON и KML; обеспечивает высокую производительность при выполнении запросов и операций, связанных с геопространственными данными; реализует возможность оптимизации запросов и использования пространственных индексов для ускорения выполнения операций; поддерживает высокую надежность и доступность данных, включая механизмы репликации и резервного копирования.

Структуру базы геоданных определяют классы объектов и наборы этих классов: «Инфраструктура» (административные районы Оренбургской области, дороги, линии электропередач, тоннели), «Геология» (карьеры, шахты, месторождения — места, где осуществляется добыча газа, нефти, а также скважины добычи нефти и газа), «Природа» (пляжи, реки, пастбища, болота), «Сейсмика» (сейсмические события, типы сейсмических событий: природное, техногенное, взрыв, импульс), а также непространственные таблицы («Источники данных», «Система координат», «Типы объектов геологии», «Типы месторождения», «Типы объектов инфраструктуры», «Типы природных объектов», «Типы события»).

Сущности, атрибуты и связи, содержащиеся в логической модели объектно-реляционной базы геоданных, представлены в табл. 1.

Сущность	Атрибуты	Связи
Геология	Тип геологического объекта, название объекта, пространственные координаты объекта, параметры месторождения, географическое отображение объекта и источник данных	Тип месторождения, тип объекта геологии; административные районы; источник данных
Инфраструктура	Тип объекта инфраструктуры, наименование объекта, пространственные координаты объекта, географическое отображение и источник данных	Тип объекта инфраструктуры; источник данных
Природа	Тип природного объекта, наименование объекта, пространственные координаты объекта, географическое отображение и источник данных	Тип природного объекта; источник данных
Сейсмика	Тип сейсмического события, пространственные координаты сейсмического события, время возникновения, глубина, локальная магнитуда сейсмического события, географическое отображение объекта и источник данных	Тип сейсмического события
Источники данных	Источник пространственных / пространственно-временных данных объектов	Система координат
Административные границы	Названия районов Оренбургской области	—
Тип месторождения	Характеристика месторождения	—
Тип объекта геологии	Тип геологического объекта	—
Тип объекта инфраструктуры	Тип объекта инфраструктуры	—
Тип природного объекта	Тип объекта природы	—
Система координат	Система координат, в которой выполнено географическое отображение исходных данных	—
Тип сейсмического события	Тип природного объекта, название объекта, пространственно-временные координаты объекта и источник данных	—

Основные реализуемые запросы к базе геоданных — это выбор определенных месторождений и их вывод в географическом отображении; выбор определенного административного района и вывод всех месторождений в этом районе; выбор определенных объектов месторождений; выбор определенных объектов инфраструктуры; выбор определенных природных объектов; выбор определенных источников данных; выбор определенных систем координат; выбор по сейсмическим событиям и их типам.

Архитектура базы геоданных является внешней по отношению к ГИС. Связь осуществляется через открытое подключение к базе данных (*англ.* Open Database Connectivity), которое обеспечивает совместимость прикладных программ и использование различных приложений при работе с базами данных, а также позволяет программам посредством операторов языка SQL взаимодействовать с различными СУБД (как персональными, так и многопользовательскими), функционирующими в различных операционных системах [25].

4. Программная подсистема оценки сейсмического режима

Программная подсистема оценки сейсмического режима построена по принципам объектно ориентированного программирования, что обеспечивает расширяемость, поддерживаемость и независимость компонентов. Центральным компонентом архитектуры программной подсистемы является SeismicAnalysisApp, который агрегирует все остальные модули — загрузку и обработку данных, создание и отображение карты, фильтрацию событий в полигоне и построение математических моделей, графиков повторяемости сейсмических событий в выбранном полигоне, а также модули кластеризации, генетический алгоритм для определения оптимального количества кластеров, нейросеть в виде многослойного персептрона и модуль построения карт сейсмического районирования сеточным методом и по буферным зонам месторождений и карьеров. Для визуализации используются компоненты на базе Folium/Leaflet.js. Взаимодействие Python и JavaScript обеспечивается через QWebChannel. Основные функции приложения — загрузка геоданных из базы и их предварительная обработка, визуализация событий на интерактивной карте (Folium/Leaflet.js), выделение пользователем произвольных областей (полигонов) для анализа, кластеризация сейсмических событий, определение оптимального количества кластеров, построение карты сейсмического районирования и графиков повторяемости событий по выбранной области, расчет параметров сейсмического режима и экспорт результатов анализа и карт [26, 27].

3.2 Применение основных подсистем разработанной ГИС на примере Оренбургской области

3.2.1 Загрузка исходных геоданных о сейсмических событиях

Источниками пространственной и пространственно-временной информации для тестирования разработанной ГИС являются каталоги сейсмических событий, объединенные в единую базу геоданных средствами СУБД PostgreSQL. При подключении к базе геоданных и выполнении SQL-запросов используется модуль Psycopg2 для языка программирования Python. Результат запроса по каталогам сейсмических событий представляется с помощью библиотеки Pandas в формате таблиц объекта DataFrame. Пример результата описанной процедуры ввода и выборки рассматриваемого периода с 2008 по 2021 год проиллюстрирован для восточной части Оренбургской области в табл. 2 в виде фрагмента данных Казахстанского сейсмологического центра данных.

Таблица 2

Фрагмент каталога сейсмических событий

Table 2

A fragment of the seismic events catalog

	date&time	lat	lon	depth	mb	K
1647	2008-01-01 08:14:00	51,5612	59,3328	2	2,3	5,0
1648	2008-01-02 08:40:01	51,5815	59,3703	2	2,2	5,4
1649	2008-01-02 10:52:30	51,9429	58,9822	2	1,9	5,1
1650	2008-01-03 13:09:06	50,9098	60,5616	2	1,7	4,9
1651	2008-01-05 10:23:14	50,8976	59,5527	2	1,8	5,4
...	...	...	...	...	...	...
12432	2021-12-28 11:40:04	51,0496	59,9667	3	2,6	6,2
12433	2021-12-28 10:56:32	51,2995	58,7366	3	2,5	5,6
12434	2021-12-29 07:21:25	50,8240	59,8070	2	1,9	5,3
12435	2021-12-29 06:57:00	51,2244	58,7633	3	2,7	6,3
12436	2021-12-29 02:55:01	51,5619	58,7200	2	2,0	4,1

Примечание: date&time — время зарегистрированного сейсмического события в формате «год-месяц-день час:минуты:секунды»; lat — географическая широта очага сейсмического события в градусах; lon — географическая долгота очага сейсмического события в градусах; depth — глубина очага сейсмического события в километрах; mb — магнитуда сейсмического события, определенная по объемным волнам; K — энергетический класс сейсмического события.

3.2.2 Пространственное распределение сейсмических событий
Географическое распределение сейсмических событий представим путем создания интерактивной карты Оренбургской области из открытого источника OpenStreetMap и добавления слоев, хранящихся в базе геоданных:

- слоя «Сейсмические события 1» (красные точки на рис. 4), в состав которого агрегированы данные из каталогов сейсмических событий месторождений углеводородов и который составлен по геоданным центра обработки сейсмологических данных отдела геоэкологии ОФИЦ УрО РАН;
- слоя «Сейсмические события 2» (оранжевые точки на рис. 4), составленного по каталогам КНЦД и хранящегося в разработанной базе геоданных;
- слоя «Месторождения углеводородов Оренбургской области» (синие полигоны на рис. 4).

Рис. 4

Географическое распределение сейсмических событий Оренбургской области за 2008–2021 гг.

Fig. 4

Geographical distribution of seismic events in the Orenburg Region from 2008 to 2021

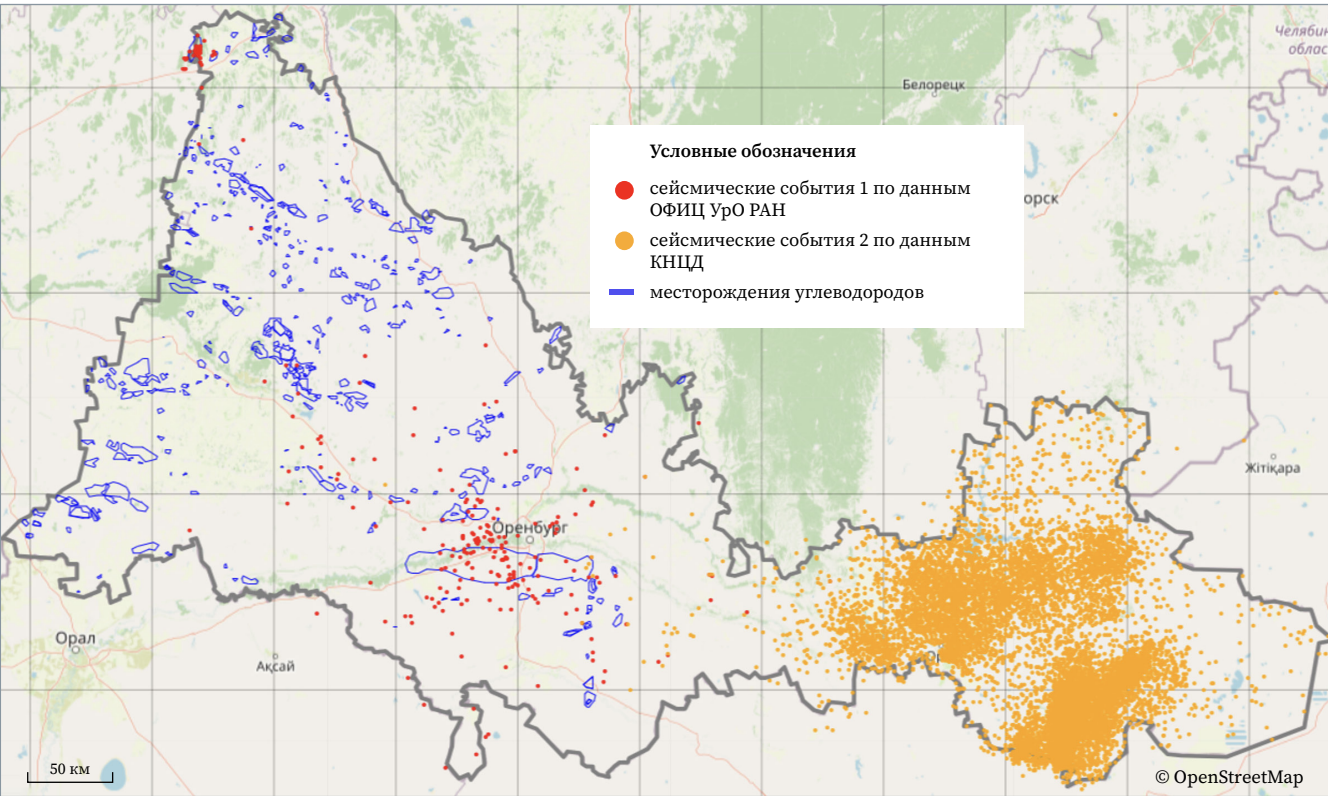


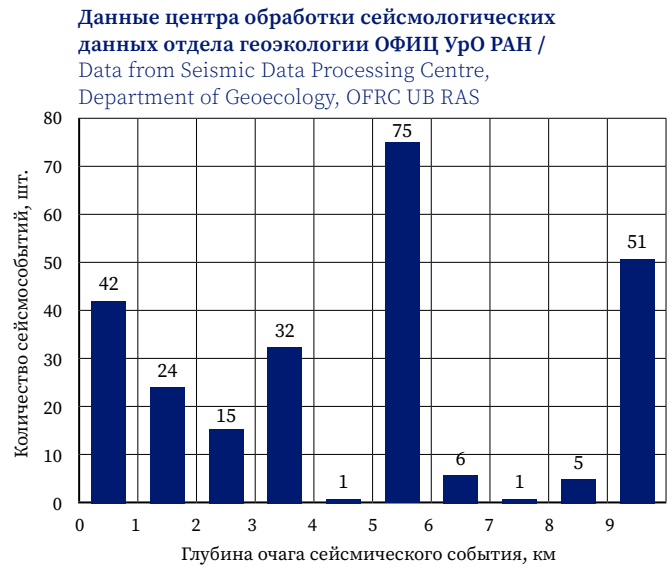
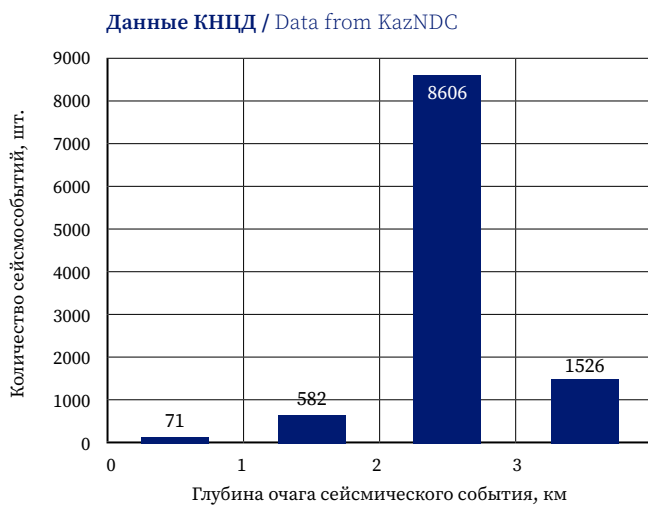
Рис. 5 ▼

Частота сейсмических событий Оренбургской области по глубине очагов

Fig. 5

Frequency of seismic events in the Orenburg Region by depth of origin

На основе пространственного распределения геоданных о сейсмических событиях, зарегистрированных на территории Оренбургской области, отмечается формирование четырех основных кластеров поверхностной сейсмичности. Два кластера находятся на востоке Оренбургской области. Их локализация привязана к районам активной разработки месторождений твердых полезных ископаемых с глубиной очага, не превышающей 4 км, по данным КНЦД (рис. 5). Кластер, расположенный в центральной части рассматриваемой территории, привязан к району эксплуатации Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения, а кластер в северо-западной части — к району разрабатываемого Байтуганского нефтяного месторождения с глубиной очага, не превышающей 10 км, по данным центра обработки сейсмологических данных отдела геоэкологии ОФИЦ УрО РАН (рис. 5).



3.2.3 Распределение сейсмических событий по энергетическому классу

Интенсивность природно-техногенных сейсмических событий, зарегистрированных на территории Оренбургской области разными сейсмологическими сетями, представлена в каталогах разными параметрами, сопоставление систем классификации землетрясений в локальных магнитудах исследовано в работе [28]. Для региональной сети «Нефтегаз-сейсмика» оценка проводится на основе сдвиговых волн по амплитуде колебаний грунта вблизи их эпицентра (M_l), а для сейсмологической сети Института геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан в связи с ее удаленностью от рассматриваемой территории интенсивность оценивается на основе амплитуды продольных волн (M_b). В связи с этим для обобщенной оценки распределения сейсмических событий Оренбургской области используется такой параметр, как энергетический класс сейсмического события, представляющий собой десятичный логарифм энергии, высвобожденной очагом⁵. Распределение этого параметра на исследуемой территории (рис. 6) отражает типичную картину: значения энергетического класса K наблюдаемых сейсмических событий находятся в диапазоне от 3 до 8, что соответствует распространенному проявлению слабых колебаний земной коры, наблюдаемому в районах интенсивной добычи природных ресурсов.

⁵ Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км // Экспериментальная сейсмика: материалы Комплексной сейсмологической экспедиции. М.: Наука, 1964. С. 86–93.

Данные КНЦД / Data from KazNDC

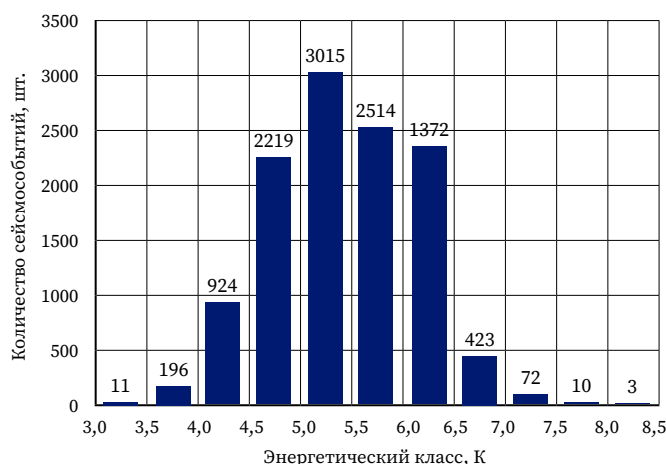


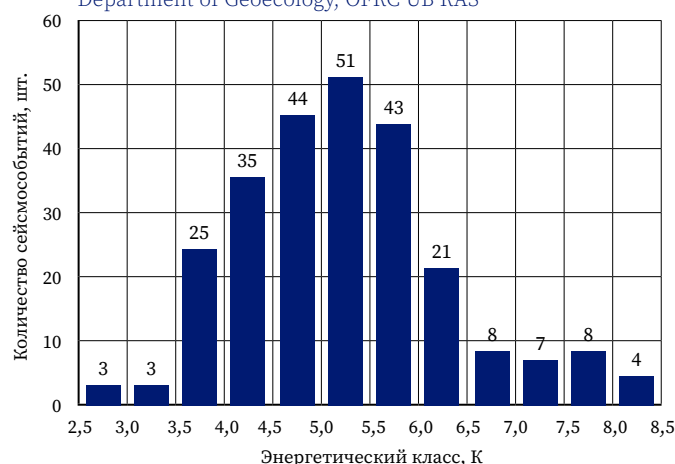
Рис. 6 ▲

Частота сейсмических событий Оренбургской области по энергетическому классу

Fig. 6

Frequency of seismic events in the Orenburg Region by energy class

Данные центра обработки сейсмологических данных отдела геоэкологии ОФИЦ УрО РАН /
Data from Seismic Data Processing Centre,
Department of Geoecology, OFRC UB RAS



3.2.4 Распределения сейсмических событий по времени

За период наблюдений с 2008 по 2021 год на территории Оренбургской области зарегистрировано около 13 тысяч сейсмических событий, из них сейсмологической сетью Института геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан — около 12,5 тысяч, Оренбургской региональной сетью «Нефтегаз-сейсмика» — несколько сотен (рис. 7). Около 70 % всех зарегистрированных сейсмических событий произошли в утренние и дневные часы (рис. 8), совпадающие с периодом активной производственной деятельности по добыче ресурсов, что свидетельствует о преимущественно антропогенном происхождении данных явлений.

Рис. 7 ►

Распределение сейсмических событий Оренбургской области по годам

Fig. 7

Distribution of seismic events in the Orenburg Region by year

Условные обозначения

- ОФИЦ УрО РАН
- КНЦД

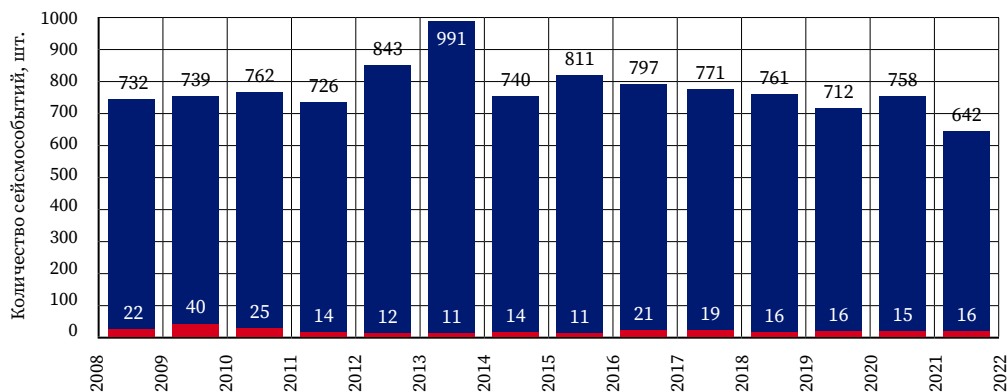


Рис. 8 ►

Частота сейсмических событий Оренбургской области по времени суток

Fig. 8

Frequency of seismic events in the Orenburg Region by time of day

Данные КНЦД /
Data from KazNDC

Данные центра обработки сейсмологических данных отдела геоэкологии ОФИЦ УрО РАН /
Data from Seismic Data Processing Centre,
Department of Geoecology, OFRC UB RAS



4 Выводы

Проведенное исследование позволило достичь следующих результатов:

1. Предложены научно-методологические основы построения веб-браузерной ГИС анализа региональной природно-техногенной сейсмичности на месторождениях углеводородов. Основными компонентами данной системы являются база источников, эмпирическая, теоретическая и инструментальная базы, включающие методы построения современных ГИС, методы сбора и обработки исходной пространственно-временной информации, методы анализа пространственно-временной информации для оценки сейсмического режима, методы геопро пространственного анализа и пространственной визуализации.
2. Средствами СУБД PostgreSQL разработана объектно-реляционная база геоданных для ввода, хранения, обработки географической, геологической, гидрологической информации о территориях разрабатываемых месторождений Оренбургской области, а также получаемой из различных открытых и закрытых источников (в разных форматах, структурах и системах координат) пространственно-временной информации о сейсмичности и параметрах разработки исследуемых месторождений.
3. Спроектирована архитектура ГИС (а затем разработана сама система), которая позволяет хранить разнородную пространственную и пространственно-временную информацию об объектах и процессах добывающей промышленности на территории разрабатываемых месторождений и реализовывать методы и алгоритмы обработки и анализа геоданных для оценки регистрируемых явлений слабой сейсмичности на платформенных территориях в условиях техногенного воздействия с учетом представления сейсмического режима в пятимерном пространстве.
4. Протестированы обеспечивающие подсистемы ГИС для ввода, хранения, обработки, анализа геоданных и визуализации на примере оценки общей сейсмичности Оренбургской области. На основе этого можно сделать вывод о формировании на рассматриваемой территории четырех основных кластеров, привязанных к районам активной добычи природных ресурсов, со слабой поверхностной сейсмичностью преимущественно антропогенного происхождения.

благодарности

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы FUUG-2022-0005 «Разработка научных основ комплексного природопользования, обеспечивающего устойчивое развитие природы с участием человека и с учетом его интересов на примере Южного Урала».

библиография

1. Подольская Е.С., Некрасова А.К., Прохорова Т.В. и др. Отечественный научный опыт использования веб-геоинформационных систем в сейсмологии // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25, № 5. ES5026. DOI:10.2205/2025es001035.
2. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Юшкин В.Ф. и др. О влиянии природно-климатических и техногенных факторов на развитие механо-эрозионных и сейсмодиссипационных процессов в окрестностях угольных разрезов Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 9. С. 72–101. DOI:10.25018/0236-1493-2019-09-0-72-101.
3. Опарин В.Н., Потапов В.П. Развитие теории и методов создания динамических геоинформационных систем с вычислительным ядром оценивания параметров движений и напряженно-деформированного состояния земной коры по разнородным комплексным наблюдениям // Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. Т. 2. С. 220–245.
4. Гитис В.Г., Дерендяев А.Б., Петров К.Н. и др. Геоинформационная платформа мониторинга геофизических полей, прогноза землетрясений и исследования сейсмогенных процессов // Информационные процессы. 2023. Т. 23, № 1. С. 168–183. DOI:10.53921/18195822_2023_23_1_168.

5. Какоурова А.А., Ключевский А.В., Демьянович В.М. и др. Геоинформационные критерии выделения квазилинейных цепочек миграции землетрясений в эпицентральных полях сложной геометрии и переменной плотности распределения толчков // Геоинформатика. 2021. № 2. С. 4–25. DOI:10.47148/1609-364X-2021-2-4-25.
6. Корнилков С.В., Рыбников П.А., Ведерников А.С. и др. О концепции создания геоинформационной системы «Безопасность природо- и недропользования» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S23. С. 32–42. DOI:10.25018/0236-1493-2017-10-23-32-42.
7. Михеева А.В., Дядьков П.Г., Марчук А.Г. Геоинформационная система GIS-EEDB и методы пространственно-временного анализа сейсмологических данных // Геоинформатика. 2013. № 2. С. 58–65.
8. Кануков А.С., Мельков Д.А. Практическая реализация геоинформационной системы с поддержкой моделирования последствий опасных природно-техногенных процессов // Геология и геофизика Юга России. 2018. № 2. С. 30–45. DOI:10.23671/VNC.2018.2.14354.
9. Блинова Т.С., Удоратин В.В., Дягилев Р.А. и др. Сейсмичность и сейсмическое районирование слабоактивных территорий: монография. Пермь: Горный институт Уральского отделения РАН, 2015. 178 с.
10. Нестеренко М.Ю., Карпюк М.С., Влацкий В.В. Автоматизированная распределенная ГИС-система мониторинга и оценки риска функционирования природно-техногенных объектов нефтегазовой промышленности // Российскому научному обществу анализа риска 15 лет: основные итоги и перспективы деятельности. М.: ВНИИ ГОЧС МЧС России, 2018. С. 347–352.
11. Калуж Ю.А., Кужугет К.О.С., Чупикова С.А. и др. Анализ сейсмических событий в Республике Тыва с помощью геоинформационных технологий // Геоинформатика. 2012. № 4. С. 64–67.
12. Kumar H., Suman S., Rawat A., et al. A GIS Based Earthquake Hazard Pattern Identification Implementing the Local Site-Specific Parameters and the Historical Seismicity // Revue Internationale de Géomatique. 2025. Vol. 34. Iss. 1. P. 351–362. DOI:10.32604/rig.2025.064031.
13. Shalu, Acharya T., Gharekhan D., et al. Harnessing ML and GIS for Seismic Vulnerability Assessment and Risk Prioritization // Revue Internationale de Géomatique. 2024. Vol. 33. Iss. 1. P. 111–134. DOI:10.32604/rig.2024.051788.
14. Fan Z., Xu X. Application and Visualization of Typical Clustering Algorithms in Seismic Data Analysis // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 151. P. 171–178. DOI:10.1016/j.procs.2019.04.026.
15. Shang X., Li X., Morales-Esteban A., et al. Data Field-Based K-Means Clustering for Spatio-Temporal Seismicity Analysis and Hazard Assessment // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. Iss. 3. P. 461. DOI:10.3390/rs10030461.
16. Jia L., Chen H., Xing K. Rapid Classification of Local Seismic Events Using Machine Learning // Journal of Seismology. 2022. Vol. 26. Iss. 1. P. 897–912. DOI:10.1007/s10950-022-10109-5.
17. Essam Y., Kumar P., Ahmed A.N., et al. Exploring the Reliability of Different Artificial Intelligence Techniques in Predicting Earthquake for Malaysia // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2021. Vol. 147. P. 106826. DOI:10.1016/j.soildyn.2021.106826.
18. Navaid H.B., Eyinla D.S., Emadi H. Addressing the Complexities of Predicting Induced Seismicity: A Simplified Hybrid Approach to Understanding the Geomechanics of CO2 Injection in Faulted Reservoirs // Geoenergy Science and Engineering. 2026. Vol. 261. P. 214435. DOI:10.1016/j.geoen.2026.214435.
19. Grigoli F., Cesca S., Priolo E., et al. Current Challenges in Monitoring, Discrimination, and Management of Induced Seismicity Related to Underground Industrial Activities: A European Perspective // Reviews of Geophysics. 2017. Vol. 55. Iss. 2. P. 310–340. DOI:10.1002/2016RG000542.
20. Dost B., Ruigrok E., Spetzler J., et al. Natural and Induced Seismicity // Geology of the Netherlands: Second Edition / J.H. ten Veen, G.-J. Vis, J. de Jager, T.E. Wong (eds.). Amsterdam: Amsterdam University Press, 2025. P. 793–823. DOI:10.2307/jj.27435714.26.

21. Kuveždić Divjak A., Govorcín M., Matoš B., et al. Geoinformation for Research of Ongoing Geodynamic Processes in the Republic of Croatia // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-3/W8. P. 233–240. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-233-2019.
22. Быстров А.Ю., Майоров А.А. Обзор современных теорий и принципов построения мультифункциональных динамических мониторинговых геоинформационных систем // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65, № 1. С. 108–116. DOI:10.30533/0536-101X-2020-65-1-108-116.
23. Асминг В.Э., Асминг С.В., Баранов С.В. и др. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2022 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024. С. 31–38.
24. Нестеренко М.Ю., Алешин И.М., Гоев А.Г. и др. Оренбургская региональная сеть «Нефтегаз-сейсмика» // Сейсмические приборы. 2023. Т. 59, № 2. С. 5–17. DOI:10.21455/si2023.2-1.
25. Матчин В.Т. Базы геоданных // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 3 (20). С. 100–108. DOI:10.21777/2500-2112-2017-3-100-108.
26. Капустина О.А., Автайкина О.А. Подсистема интерактивного анализа сейсмических данных с использованием полигонального выбора областей // Актуальные вопросы обеспечения комплексной безопасности: материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 35-летию МЧС России и 95-летию Оренбургского ГАУ, Оренбург, 23 мая 2025 г. Оренбург: Оренбургский ГАУ, 2025. С. 1701–1705.
27. Капустина О.А., Нестеренко М.Ю., Антонова О.В. Первичный анализ пространственно-временных данных для оценки геодинамического состояния месторождений полезных ископаемых // Отходы и ресурсы. 2025. Т. 12, № 2. 13INOR225. DOI:10.15862/13INOR225.
28. Петрова Н.В., Курова А.Д. Сопоставление систем классификации землетрясений в локальных магнитудах M_L в некоторых регионах Северной Евразии // Российский сейсмологический журнал. 2023. Т. 5, № 2. С. 61–76. DOI:10.35540/2686-7907.2023.2.05.

авторы **Капустина Оксана Александровна**

ФГБУН «Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ОФИЦ УрО РАН), Оренбург, Россия
отдел геоэкологии
канд. техн. наук, доцент
 0000-0001-8981-6599

Антонова Ольга Викторовна

 olga-oren@rambler.ru
ФГБУН «Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ОФИЦ УрО РАН), Оренбург, Россия
отдел геоэкологии

Поступила 28.11.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликовано 27.02.2026.



Geoinformation System for Assessing Natural and Technogenic Seismicity of Mineral Deposits

Oksana A. Kapustina¹✉, Olga V. Antonova²

¹ Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Orenburg, Russia
✉ onical@yandex.ru

citation Kapustina OA, Antonova OV. Geoinformation System for Assessing Natural and Technogenic Seismicity of Mineral Deposits. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 110–127. DOI:10.30533/GiA-2026-008.

keywords architecture of a geographic information system, methodology for geographic information system development, deposit, minerals, natural and man-made seismicity

abstract In this paper, we propose a methodology for building a specialized geoinformation system for analyzing spatiotemporal information about recorded seismic phenomena under conditions of anthropogenic impact on platform territories, taking into account regional peculiarities. The main components of the geoinformation system construction methodology are highlighted in the form of a database of sources, an empirical base, a theoretical base and an instrumental base. A minimum set of classes of methods for constructing a geoinformation system for assessing natural and man-made seismicity in mining areas has been determined, characterized by the presence of machine learning methods and multiparametric analysis of spatial and spatiotemporal information, which makes it possible to assess the seismic regime of the techno-natural system and the degree of influence of field development parameters on seismicity. The most important result of this study is the developed functional structure of a geoinformation system for assessing natural and man-made seismicity. The main supporting subsystems of which are: hardware in the form of the Neftgaz-seismika seismological network, mathematical, and information support, including the geodata database of the Postgre SQL object-relational database management system with the PostGIS geospatial extension, interactive software built according to the principles of object-oriented programming in Python, interacting with JavaScript via QWebChannel and cartographic visualization through Folium-based components / Leaflet.js. The authors tested the main modules of the geoinformation system for data input, statistical analysis, and visualization using the example of assessing the overall seismicity of the Orenburg Region.

acknowledgements

The work was carried out as part of the state budget topic FUUG-2022-0005 “Development of scientific foundations for integrated environmental management that ensures sustainable development of nature with human participation and consideration of human interests, using the example of the Southern Urals”.

references

1. Podol'skaya ES, Nekrasova AK, Prohorova TV, et al. Otechestvennyj nauchnyj opyt ispol'zovaniya veb-geoinformacionnykh sistem v seismologii [Russian Scientific Experience of Using Web-Based Geoinformation Systems in Seismology]. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025;25(5): ES5026. (In Russian). DOI:10.2205/2025es001035.
2. Oparin VN, Adushkin VV, Yushkin VF, et al. O vliyani prirodno-klimaticheskikh i tehnogennykh faktorov na razvitie mehano-erozionnykh i seysmoemissionnykh processov v okrestnostyakh ugol'nykh razrezov Kuzbassa [Influence of Natural Climate and Mining-Induced Impact on Mechanical Erosion and Seismic Noise in the Areas of Open Pit Coal Mines in Kuzbass]. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2019;9: 72–101. (In Russian). DOI:10.25018/0236-1493-2019-09-0-72-101.
3. Oparin VN, Potapov VP. Razvitie teorii i metodov sozdaniya dinamicheskikh geoinformacionnykh sistem s vychislitel'nym yadrom ocenivaniya parametrov dvizheniy i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zemnoy kory po raznorodnym kompleksnym nablyudeniym [Development of Theory and Methods for Creating Dynamic Geoinformation Systems with a Computational Core for Estimating the Parameters of Movements and the Stress-Strain State of the Earth's Crust Based on Heterogeneous Complex Observations]. *Geomechanical Fields and Processes: Experimental-and-Analytical Research into Initiation and Growth of Source Zones of Disastrous Events in Geotechnical and Natural Systems*. Novosibirsk: SB RAS; 2019;2: 220–245. (In Russian).
4. Gitis VG, Derendyaev AB, Petrov KN, et al. Geoinformacionnaya platforma monitoringa geofizicheskikh poley, prognoza zemletryaseniy i issledovaniya seysmogennykh processov [Geoinformation Monitoring Platform of Geophysical Fields, Earthquake Prediction and Seismogenic Processes Studies]. *Information Processes*. 2023;23(1): 168–183. (In Russian). DOI:10.53921/18195822_2023_23_1_168.
5. Kakourova AA, Klyuchevskiy AV, Dem'yanovich VM, et al. Geoinformacionnye kriterii vydeleniya kvazilineynykh cepochek migracii zemletryaseniy v epicentral'nykh polyah slozhnoy geometrii i peremennoy plotnosti raspredeleniya tolchkov [Geoinformational Criteria for Distinguishing the Quasi-Linear Chains of Earthquake Migration in Epicentral Fields of Complex Geometry and Variable Density of Shocks Distribution]. *Geoinformatika*. 2021;2: 4–25. (In Russian). DOI:10.47148/1609-364X-2021-2-4-25.
6. Kornil'kov SV, Rybnikov PA, Vedernikov AS, et al. O koncepcii sozdaniya geoinformacionnoy sistemy “Bezopasnost' prirodno- i nedropol'zovaniya” [On the Concept of Creation of the Geoinformation System “Safety of Nature and Subsoil Use”]. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2017;S23: 32–42. (In Russian). DOI:10.25018/0236-1493-2017-10-23-32-42.
7. Miheeva AV, Dyad'kov PG, Marchuk AG. Geoinformacionnaya sistema GIS-EEDB i metody prostranstvenno-vremennogo analiza seysmologicheskikh dannykh [Geoinformation System GIS-EEDB and Methods of the Spatial-Temporal Analysis of Seismologic Data]. *Geoinformatika*. 2013;2: 58–65. (In Russian).
8. Kanukov AS, Mel'kov DA. Prakticheskaya realizaciya geoinformacionnoy sistemy s podderzhkoy modelirovaniya posledstviy opasnykh prirodno-tehnogennykh processov [Practical Implementation of Geographic Information System with Support for Modeling the Effects of Dangerous Natural and Man-Made Processes]. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2018;2: 30–45. (In Russian). DOI:10.23671/VNC.2018.2.14354.
9. Blinova TS, Udoratin VV, Dyagilev RA, et al. *Seysmichnost' i seysmicheskoe rayonirovaniye slaboaktivnykh territoriy* [Seismicity and Seismic Zoning of Weakly Active Territories] [monograph]. Perm: Mining Institute of the Ural Branch of RAS; 2015. 178 p. (In Russian).
10. Nesterenko MYu, Karpyuk MS, Vlatskii VV. Avtomatizirovannaya raspredelennaya GIS-sistema monitoringa i otsenki riska funktsionirovaniya prirodno-tehnogennykh ob'ektov neftegazovoi promyshlennosti [Automated Distributed GIS-System of Monitoring and Risk Assessment of the Functioning of Natural and Technogenic Objects of the Oil and Gas Industry]. *Russian Scientific Society for Risk Analysis Is 15 Years*

- Old: The Main Results and Prospects of Its Activities*. Moscow: All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies of the EMERCOM of Russia; 2018: 347–352. (In Russian).
11. Kalush YuA, Kuzhuget KOS, Chupikova SA, et al. Analiz seismicheskikh sobytiy v Respublike Tyva s pomosh'yu geoinformacionnykh tekhnologiy [An Analysis of the Seismic Events in the Republic of Tuva with Use of Geoinformation Technologies]. *Geoinformatika*. 2012;4: 64–67. (In Russian).
 12. Kumar H, Suman S, Rawat A, et al. A GIS Based Earthquake Hazard Pattern Identification Implementing the Local Site-Specific Parameters and the Historical Seismicity. *Revue Internationale de Géomatique*. 2025;34(1): 351–362. DOI:10.32604/rig.2025.064031.
 13. Shalu, Acharya T, Gharekhan D, et al. Harnessing ML and GIS for Seismic Vulnerability Assessment and Risk Prioritization. *Revue Internationale de Géomatique*. 2024;33(1): 111–134. DOI:10.32604/rig.2024.051788.
 14. Fan Z, Xu X. Application and Visualization of Typical Clustering Algorithms in Seismic Data Analysis. *Procedia Computer Science*. 2019;151: 171–178. DOI:10.1016/j.procs.2019.04.026.
 15. Shang X, Li X, Morales-Esteban A, et al. Data Field-Based K-Means Clustering for Spatio-Temporal Seismicity Analysis and Hazard Assessment. *Remote Sensing*. 2018;10(3): 461. DOI:10.3390/rs10030461.
 16. Jia L, Chen H, Xing K. Rapid Classification of Local Seismic Events Using Machine Learning. *Journal of Seismology*. 2022;26(1): 897–912. DOI:10.1007/s10950-022-10109-5.
 17. Essam Y, Kumar P, Ahmed AN, et al. Exploring the Reliability of Different Artificial Intelligence Techniques in Predicting Earthquake for Malaysia. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021;147: 106826. DOI:10.1016/j.soildyn.2021.106826.
 18. Navaid HB, Eyinla DS, Emadi H. Addressing the Complexities of Predicting Induced Seismicity: A Simplified Hybrid Approach to Understanding the Geomechanics of CO₂ Injection in Faulted Reservoirs. *Geoenergy Science and Engineering*. 2026;261: 214435. DOI:10.1016/j.geoen.2026.214435.
 19. Grigoli F, Cesca S, Priolo E, et al. Current Challenges in Monitoring, Discrimination, and Management of Induced Seismicity Related to Underground Industrial Activities: A European Perspective. *Reviews of Geophysics*. 2017;55(2): 310–340. DOI:10.1002/2016RG000542.
 20. Dost B, Ruigrok E, Spetzler J, et al. Natural and Induced Seismicity. *Geology of the Netherlands: Second Edition*. Veen ten JH, Vis GJ, Jager de J, Wong TE. (eds.). Amsterdam: Amsterdam University Press; 2025: 793–823. DOI:10.2307/jj.27435714.26.
 21. Kuveždić Divjak A, Govorcina M, Matoš B, et al. Geoinformation for Research of Ongoing Geodynamic Processes in the Republic of Croatia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019;XLII-3/W8: 233–240. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-233-2019.
 22. Bystrov AY, Mayorov AA. Obzor sovremennykh teoriy i principov postroeniya mul'tifunkcional'nykh dinamicheskikh monitoringovykh geoinformacionnykh sistem [Overview of Modern Theories and Principles of Construction Multifunctional Dynamic Monitoring Geographic Information Systems]. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2021;65(1): 108–116. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2020-65-1-108-116.
 23. Asming VE, Asming SV, Baranov SV, et al. Vostochno-Evropeiskaya platforma, Ural i Zapadnaya Sibir' [The Eastern European Platform, the Urals and Western Siberia]. *Earthquakes in Russia in 2022*. Obninsk: GS RAS; 2024: 31–38. (In Russian).
 24. Nesterenko MY, Aleshin IM, Goev AG, et al. Orenburgskaya regional'naya set' "Neftegaz-seysmika" [Orenburg Regional Network "Neftegaz-seismika"]. *Seismic Instruments*. 2023;59(2): 5–17. (In Russian). DOI:10.21455/si2023.2-1.
 25. Matchin VT. Bazy geodannykh [Geodatabases]. *Education Resources and Technologies*. 2017;3(20): 100–108. (In Russian). DOI:10.21777/2500-2112-2017-3-100-108.
 26. Kapustina OA, Avtaikina OA. Podsystema interaktivnogo analiza seismicheskikh dannykh s ispol'zovaniem poligonal'nogo vybora oblastei [Subsystem for Interactive Analysis of Seismic Data Using Polygonal Selection of Areas]. *Topical Issues of Ensuring Integrated Security: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 35th Anniversary of the EMERCOM*

- of Russia and the 95th Anniversary of the Orenburg State Agrarian University, Orenburg, May 23, 2025.* Orenburg: Orenburg SAU; 2025: 1701–1705. (In Russian).
27. Kapustina OA, Nesterenko MYu, Antonova OV. Pervichnyj analiz prostranstvenno-vremennyh dannyh dlya ocenki geodinamicheskogo sostoyaniya mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh [Primary Analysis of Spatiotemporal Data to Assess the Geodynamic State of Mineral Deposits]. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025;12(2): 13INOR225. (In Russian). DOI:10.15862/13INOR225.
 28. Petrova NV, Kurova AD. Sopostavlenie sistem klassifikatsii zemletryaseni v lokal'nykh magnitudakh ML v nekotorykh regionakh Severnoi Evrazii [Comparison of Earthquake Classification Systems in Local Magnitudes ML in Some Regions of Northern Eurasia]. *Russian Journal of Seismology*. 2023;5(2): 61–76. (In Russian). DOI:10.35540/2686-7907.2023.2.05.

authors**Oksana A. Kapustina**

Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Orenburg, Russia

Department of Geoecology

PhD in Engineering, Associate Professor

 0000-0001-8981-6599

Olga V. Antonova

 olga-oren@rambler.ru

Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Orenburg, Russia

Department of Geoecology

Submitted: November 28, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.