Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-127-133

Геоинформационный мониторинг для решения экологических задач горнопромышленных территорий Среднего Урала

С.В. Корнилков[1], Л.С. Рыбникова[1], П.А. Рыбников[1, 2], А.Ю. Смирнов[1, 2]✉

[1] Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

[2] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ alexsm94@gmail.com

Резюме: Геоинформационный мониторинг показан как ведущий метод управления процессами на старопромышленных территориях. Обозначены основные этапы геоинформационного мониторинга. Рассмотрена роль геоинформационных систем в изучении компонентов загрязнения, систематизации и накоплении пространственно-распределенных данных, анализа и разработки прогнозных решений. Обосновано решение проблемы концептуальной организации геоинформационной системы горнопромышленных территорий. Рассмотрены структура программных продуктов и критерии выбора геоинформационной системы. В качестве настольной геоинформационной системы выбран программный продукт QGIS. Описаны функциональные возможности JavaScript-библиотек Leaflet и Highcharts, возможность их использования в качестве веб-системы. Описана структура базовых слоев геоинформационной системы, созданной для организации геоинформационного мониторинга старопромышленной территории Левихинского рудника. Предложен алгоритм организации пространственно-распределенных данных объекта мониторинга, принципиальный алгоритм работы с данными. Существенное внимание уделено типизации и последующей дифференциации типов исходной информации, хранению данных геоинформационной системы в обменных форматах. Описан авторский алгоритм взаимодействия между настольной и веб-системой. Изложенные в статье положения и технические решения позволяют использовать геоинформационную систему для оперативного мониторинга, разработки прогнозов и комплексной оценки, принятия управленческих решений.

Ключевые слова: геоинформационный мониторинг, геоинформационные системы, ГИС, мониторинг окружающей среды, Левихинский рудник, геоинформатика, QGIS, Leaflet, Highcharts, GIS

Благодарности: Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН по теме №0328-2019-0005.

Для цитирования: Корнилков С.В., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Геоинформационный мониторинг для решения экологических задач горнопромышленных территорий Среднего Урала. *Горная промышленность.* 2022;(1S):127–133. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-127-133.

Geoinformation monitoring for solving environmental problems of mining territories of the Middle Ural

S.V. Kornilkov[1], L.S. Rybnikova[1], P.A. Rybnikov[1, 2], A.Yu. Smirnov[1, 2]✉

[1] Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

[2] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

✉ alexsm94@gmail.com

Abstract: Geographic information monitoring is shown as the leading method of process control in old industrial territories. The main stages of geoinformation monitoring are outlined. The role of geographic information systems in the study of pollution components, systematization and accumulation of spatially distributed data, analysis and development of predictive solutions is considered. The solution of the problem of the conceptual organization of the geoinformation system of mining territories has been substantiated. The structure of software products and geographic information systems selection criteria are considered. The QGIS software product was chosen as the desktop geographic information systems. The functionality of JavaScript-libraries Leaflet and Highcharts, the possibility of their use as a web-based geographic information systems are described. The structure of the base layers of the geographic information systems, created for the organization of geoinformation monitoring of the old industrial territory of the Levikhinsky mine, is described. An algorithm for organizing spatially distributed data of the monitoring object, a fundamental algorithm for data processing are proposed. Considerable attention is paid to the typification and subsequent differentiation of the types of initial information, the storage of geographic information systems data in exchange formats. The author's algorithm of interaction between desktop and web-based geographic information systems is described. The provisions and technical solutions set out in the article allow using geographic information systems for operational monitoring, forecasting and comprehensive assessment, and management decisions.

Keywords: geoinformation monitoring, Geographic Information Systems, GIS, Environmental monitoring, Levikha copper mine, Geoinformatics, QGIS, Leaflet, Highcharts

Acknowledgments: The paper was prepared within the framework of the State Contract with Institute of Mining of Ural Branch of RAS No.0328-2019-0005.

For citation: Kornilkov S.V., Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Smirnov A.Yu. Geoinformation monitoring for solving environmental problems of mining territories of the Middle Ural. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2022;(1 Suppl.):127–133. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-127-133.

С.В. Корнилков,
доктор технических наук,
профессор,
член Академии горных наук,
главный научный сотрудник,
Института горного дела
Уральского отделения РАН

П.А. Рыбников,
кандидат геолого-минералогических
наук, заведующий лабораторией
геоинформационных и цифровых
технологий в недропользовании
Института горного дела
Уральского отделения РАН

Л.С. Рыбникова,
доктор геолого-
минералогических наук,
главный научный сотрудник,
Института горного дела
Уральского отделения РАН

А.Ю. Смирнов,
младший научный сотрудник
лаборатории геоинформационных
и цифровых технологий
в недропользовании
Института горного дела
Уральского отделения РАН

Введение

Результаты ведения геоинформационного мониторинга являются основой для принятия решений по управлению состоянием окружающей среды на горнопромышленных территориях [1]. Целью ведения геоинформационного мониторинга являются обеспечение органов власти и лиц, принимающих решения (ЛПР), оперативной и представительной информацией о состоянии окружающей среды; обоснование мероприятий по ее санации; оперативный прогноз изменения гидродинамической и гидрохимической ситуации; разработка и обоснование природоохранных мероприятий; определение меры ответственности каждого недропользователя при комплексном воздействии на окружающую среду.

Техногенное воздействие в старопромышленных горнодобывающих районах, к которым относится Средний Урал, имеет продолжительный и сложный комплексный характер и охватывает все компоненты окружающей среды: поверхностные и подземные воды, недра, почвы, ландшафт. Факторами, определяющими изменение состояния геологической среды, являются добыча и переработка полезных ископаемых, добыча и извлечение подземных вод, ликвидация и консервация горнодобывающих производств, складирование промышленных и бытовых отходов, создание и эксплуатация прудов-осветлителей и шламонакопителей. К числу наиболее существенных негативных последствий техногенных изменений геоэкологической обстановки относятся: изменение гидродинамических условий; активизация карстовых, суффозионных и оползневых процессов; подтопление, нарушение водного баланса, оседание земной поверхности; загрязнения поверхностных и подземных вод; проявление геодинамических процессов; опустынивания территорий. Несмотря на завершение отработки большого числа месторождений полезных ископаемых (в том числе цветных металлов, угольных, содержащих колчеданную минерализацию и наиболее неблагополучных в экологическом отношении) как в основных, так и особенно в малых водотоках Уральского региона, содержание загрязняющих веществ не снижается и остается на высоком уровне. Ухудшение геоэкологической ситуации происходит как в результате прямого сброса поллютантов, так и при рассредоточенном поступлении их с горнопромышленных ландшафтов. Это происходит в процессе выноса металлов из отвалов, шламонакопителей, затопленных рудников. Интенсивность самореабилитации горнопромышленных территорий очень низкая, а ее продолжительность может составлять десятки и сотни лет.

Для адекватного управления этими процессами на старопромышленных территориях необходимы организация и проведение геоинформационного мониторинга, который

включает: оборудование наблюдательных пунктов; проведение регулярных опробований; анализ и интерпретацию полученных результатов; оценку и выявление ведущих источников загрязнения; обоснование управленческих решений для снижения техногенной нагрузки. Для хранения и обработки большого объема разнородной информации организуются специализированные базы данных, их обработка осуществляется с использованием ГИС-технологий; прогноз изменения показателей состояния окружающей среды выполняется на постояннодействующей гидрогеомиграционной модели.

Геоинформационные системы (ГИС) являются средством аккумуляции пространственно-распределенных данных для их последующей обработки и получения информации об объекте исследования, недоступной при изучении лишь отдельных компонентов системы и их характеристик. Для целей мониторинга окружающей среды крайне важно обладать широким спектром информации разного рода, которая, благодаря инструментам в составе ГИС, может быть комплексно использована и проанализирована для получения текущих характеристик исследуемого объекта, а также разработки мероприятий по уменьшению негативного влияния таких объектов на окружающую среду.

В настоящее время геоинформационные системы представляют собой мощные инструменты по редактированию и созданию растровой и векторной графики, по организации и хранению семантической информации в системах управления баз данных (СУБД), а также по анализу данных и предсказанию неизвестных значений (интерполяция, экстраполяция), в том числе статистическими методами [2; 3].

В геоинформационные системы за счет их концептуальной архитектуры также могут быть импортированы заранее подготовленные данные других программных продуктов, функциональное наполнение которых значительно шире и сложнее, поскольку они зачастую заточены на решение узкоспециализированных задач. Так, например, результаты гидрологического и гидрогеологического моделирования из таких программ, как *MODFLOW, WMS, GMS* и др., могут быть импортированы в ГИС в виде отдельных слоев или растровых данных. Хотя в современных ГИС и существуют модули, решающие подобные задачи по моделированию *(FreeWat, Arc Hydro Tools* и др.), они не позволяют создавать сложные модели, присущие горной отрасли из-за наличия осложняющих факторов (геологического строения, тектоники, гидрогеологических условий, антропогенного воздействия, необходимости учета и оценки осадконакопления и т.д.) [4–6].

Целью данной статьи являлось решение проблемы концептуальной организации геоинформационной системы горнопромышленных территорий.

Выбор геоинформационной системы и программных модулей

При выборе программных продуктов следует руководствоваться целями геоинформационного мониторинга, поскольку именно от них будут зависеть предъявляемые к ГИС требования по функциональному наполнению. Ключевой целью геоинформационного мониторинга является установление пространственно-временных трансформаций компонентов окружающей среды для их анализа и получения прогноза. При этом осуществление геоинформационного мониторинга можно разбить на логические этапы.

На начальном этапе решается задача организации работ по наблюдению компонентов окружающей среды: выбору видов анализируемых параметров, пространственного положения точек анализа и отбора проб, плотности наблюдательной сети и т.д. Качество проектирования наблюдательной сети во многом зависит от предварительного поиска и анализа архивных материалов, а также изучения современного состояния объекта. Уже на данном этапе вышеуказанные материалы используются для наполнения ГИС. Поскольку для горнопромышленных объектов ключевым аспектом анализа является исследование миграции загрязняющих веществ, наилучшим решением является организация комплексного мониторинга.

Следующим и самым продолжительным по времени этапом является сбор данных сети мониторинга и пополнение базы данных ГИС. В качестве таких данных могут выступать: анализы химического и минералогического состава пород; минеральный состав наземных и подземных вод, донных отложений, почвенного слоя; анализы воздуха; состояние биоценоза и т.д. Проработанная организация структуры ГИС, методов и последовательности обработки информации является необходимым условием, позволяющим сделать верную оценку состояния объекта, поскольку некоторые процессы становятся заметны лишь при рассмотрении комплексно.

Заключительным этапом геоинформационного мониторинга является оценка текущего состояния объекта с разработкой прогнозных сценариев состояния экосистемы. На их основе могут быть разработаны мероприятия по уменьшению негативного влияния горнопромышленных территорий. Однако из этого не следует, что после разработки таких мероприятий геоинформационный мониторинг теряет свою актуальность. Напротив, осуществление мониторинга на этапе восстановительных работ позволяет оценивать их эффективность в режиме реального времени, принимать управленческие решения и, как следствие, корректировать мероприятия по минимизации антропогенного воздействия.

Если же подойти к анализу с точки зрения ГИС, то в процессе её организации можно выделить следующие этапы:

– сбор данных об объекте исследования;

– переработка исходных данных в формат пространственно-распределенных данных (определение пространственного положения объектов, присвоение семантической информации);

– внесение пространственно-распределенных данных в ГИС;

– анализ данных и получение новой информации (в виде карт, схем, диаграмм и т.д.), обобщенных выводов.

Современные коммерческие и бесплатные ГИС, использующиеся на персональных компьютерах (такие как *ArcGIS, QGIS, MapInfo, Surfer* и т.д.), обеспечивают выполнение каждого этапа. Применение таких программных продуктов позволяет оператору ГИС вести генеральный план объекта исследования, оперативно дополняя базу данных. При этом важно понимать, что конечным потребителем обработанных данных могут являться лица, не обладающие навыками работы со сложными геоинформационными продуктами.

Таким образом, возникает потребность в разделении степени представления данных ГИС и объема применяемых функций и модулей для оператора ГИС и стороннего пользователя.

Поскольку современные ГИС обладают схожим набором

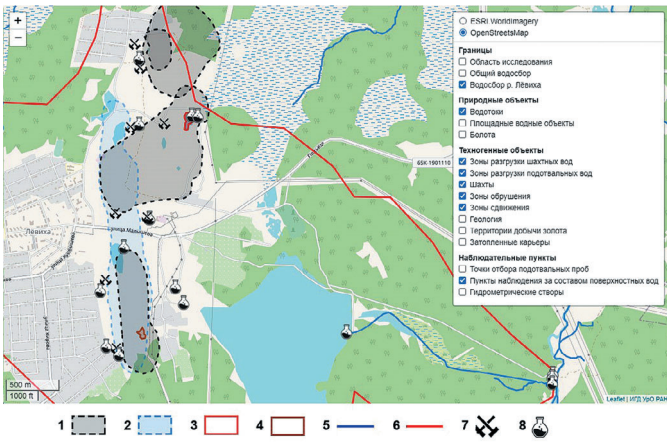

Рис. 1
Скриншот веб-страницы ГИС-приложения, использующего JavaScript-библиотеку Leaflet (бассейн р. Левихи, Свердловская область):
1 – зоны сдвижения;
2 – зоны обрушения;
3 – зоны разгрузки шахтных вод; 4 – зоны разгрузки подотвальных вод;
5 – водотоки;
6 – водосбор р. Левиха;
7 – шахтные стволы;
8 – пункты наблюдения за составом поверхностных вод

Fig. 1
A Web page screenshot of the GIS-application that uses Leaflet JavaScript-library (Levikha river basin, Sverdlovsk Region):
1 – displacement zones;
2 – caving zones; 3 – mine water discharge zones;
4 – underspoil water discharge zones;
5 – watercourses;
6 – water catchment area of the Leviha River;
7 – mine shafts;
8 – surface water composition monitoring stations

Рис. 2
Пример автоматизированного построения графических данных в Highcharts (наблюдательная точка 14, Левихинский рудник, Свердловская область)

Fig. 2
Example of automated plotting in Highcharts (observation point No.14, Levikhinsky mine, Sverdlovsk Region)

функциональных модулей, при выборе программного продукта предъявлялось требование по максимальной минимизации затрат на приобретение и внедрение таких программных продуктов.

В качестве рабочей (настольной) ГИС, в которой осуществлялось ведение генерального плана объекта исследования, был выбран программный продукт *QGIS Desktop* – свободная (некоммерческая) кроссплатформенная геоинформационная система с открытым кодом, распространяемая по лицензии GNU GPL v.2 [7]. QGIS создан в 2002 г. в рамках проекта на SourceForge по созданию средства просмотра данных ГИС-файлов, чем и объясняется широкая поддержка различных форматов файлов данных. Данная ГИС обладает обширной библиотекой бесплатных надстраиваемых модулей, что позволяет решать различные по сложности задачи, а также получать поддержку новейших форматов данных и алгоритмов их обработки.

В качестве веб-ГИС была выбрана JavaScript-библиотека с открытым исходным кодом *Leaflet* (рис. 1), широко применяемая для решения прикладных и научных задач, предназначенная для отображения картографических данных на веб-сайтах [8–10]. Данная библиотека распространяется по лицензии 2-Clause BSD License, позволяющей использовать и встраивать распространяемые модули в программы и приложения, а также свободно использовать для некоммерческих целей.

Leaflet поддерживает большинство мобильных и стационарных платформ и является одной из наиболее популярных картографических JavaScript-библиотек, использующихся по всему миру в таких крупных проектах, как Flickr, Foursquare, Craigslist, Data.gov, IGN, проектах Википедиа, OpenStreetMap, Meetup, WSJ, MapBox, CloudMade, CartoDB и пр. [8].

Основные типы данных объектов (классов) в *Leaflet*:

– растровые типы (TileLayer и ImageOverlay);

– векторные типы (Path, Polygon и специфические типы, такие как Circle);

– групповые типы (LayerGroup, FeatureGroup и GeoJSON);

– управляющие элементы (Zoom, Layers и т. д.).

Представление картографических (растровых) данных в *Leaflet* организовано в виде разбиения изображения на небольшие растровые фрагменты – тайлы, с дополнительными слоями, накладываемыми поверх основного. Слои могут быть интерактивными, например, отображать подсказку при клике по маркеру объекта. Leaflet поддерживает слои Web Map Service (WMS), GeoJSON, векторные и тайловые данные. Многие другие типы данных поддерживаются за счет библиотеки бесплатных дополнительных модулей (тепловые карты, поддержка сторонних серверов тайлов, инструментов измерений, импорта/экспорта и т.д.).

Также в составе библиотеки существуют вспомогательные классы для управления и трансформации проекций, взаимодействия с объектной моделью веб-страницы (DOM).

Но не всю информацию об объектах и явлениях удобно отображать картографическим методом. Для графической визуализации табличных данных атрибутивных слоев была применена JavaScript-библиотека с открытым исходным кодом *Highcharts* (рис. 2) [9; 11].

Highcharts – многоплатформенная библиотека графиков на основе веб-технологии SVG, активно развивающаяся с 2009 г., – написана на языке JavaScript. Ключевой особенностью библиотеки является возможность добавления интерактивных (в том числе оптимизированных для мобильных устройств и планшетов) диаграмм и графиков в веб-проекты. Библиотека содержит документацию (API) по ключевым функциям. Для построения диаграмм и графиков Highcharts может работать с любой внутренней базой данных или сервером, что устраняет необходимость установки и настройки полноценной базы данных (такой как MySQL, PostgreSQL, Oracle Database и т.д.). Благодаря этому табличные данные могут быть предоставлены во многих форматах, включая CSV, txt, JSON, или передаваться на сервер в режиме реального времени. В библиотеке также реализована поддержка использования больших объемов данных при визуализации (до нескольких миллионов табличных строк) благодаря использованию технологии WebGL. Также конечные пользователи могут

Наблюдательная точка 14 - Данные мониторинга Левихи

Category	pH (ед.pH)	медь (мг/дм3)	цинк (мг/дм3)	железо (мг/дм3)	сульфаты (мг/дм3)	марганец (мг/дм3)	сух.ост. (мг/дм3)
01.2007	4.01	5.3	1065	2113	13579	519.5	20550
01.2008	3.86	30.4	1381	3329	19124	485	39409
02.2008	3.86	67	1734	4112	25587	795	59045
01.2009	3.72	20.5	843	3678	18467	402	14310
02.2009	3.87	18	909.8	2885	17550	287	42440
03.2009	3.82	29.3	1420	3450	15265	288	34616
04.2009	3.85	12.2	1474	4195	19550	287	35186
05.2009							
06.2009	3.7	23.1	759	3703	15465	284	34500
07.2009	3.79	16.5	994	3955	16583	292	48532
08.2009	3.71	5.13	1374	3678	19950	315	47406
09.2009	3.72	16	1550	3858	18716	295	39580
10.2009	3.78	17.75	1170	4308	18583	316	47566
11.2009	3.68	19.4	734	3073	18017	273	48420
12.2009	3.85	19	1385	3555	19030	339	45766
01.2010	4.06	17.4	1158	3755	20334	276	39460
02.2010	4.09	18.6	1178	3753	16667	280	36912
03.2010	3.85	14	1457	3360	15365	308	39920
04.2010	3.85	14.2	1118	3720	13150	227	28800
05.2010	3.73	17.4	1006	3732	11983	277	25000
06.2010	3.7	12.8	974	4355	11150	246	39598

Рис. 3
Пример автоматизированного вывода исходных данных

Fig. 3
Example of automated output of initial data

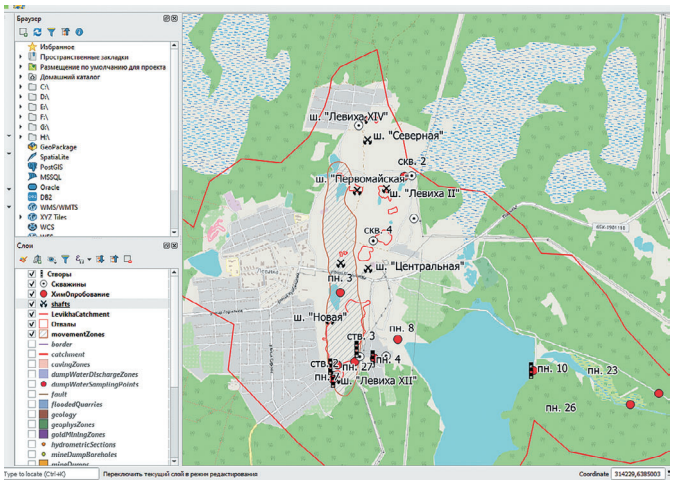

Рис. 5
Фрагмент окна рабочего проекта QGIS (бассейн р. Левихи, Свердловская область)

Fig. 5
A fragment of the QGIS working project window (Levikha river basin, Sverdlovsk Region)

сохранять диаграммы и графики в форматах PNG, JPG, PDF или SVG, выводить информацию с графика в виде таблицы (рис. 3), либо одним нажатием кнопки мыши распечатать диаграмму непосредственно с веб-страницы. Highcharts распространяется по лицензии, разрешающей загружать и использовать исходный код, вносить свои собственные изменения.

Вышеуказанные JavaScript-библиотеки являются свободными для использования в некоммерческих целях (open-source software). Исходный код таких модулей доступен для просмотра, изучения и изменения, что позволяет убедиться в отсутствии уязвимостей, использовать код для создания новых модулей либо исправления ошибок. Использование данных программных продуктов позволяет минимизировать затраты на геоинформационный мониторинг, что особенно важно для научных исследований.

Взаимодействие между данными ГИС и JavaScript-библиотеками было организовано посредством авторского исходного кода, написанного с использованием языков программирования php и JavaScript.

Принципиальный алгоритм работы с данными

На рис. 4 представлен принципиальный алгоритм работы с исходными данными, применявшийся при создании ГИС.

На первом этапе исходные данные обрабатываются оператором ГИС и сортируются на пространственно-распределенные данные и вспомогательную информацию (фотографии, сканы полевых книжек, акты обследования и т.д.), которая в дальнейшем направляется в соответствующие

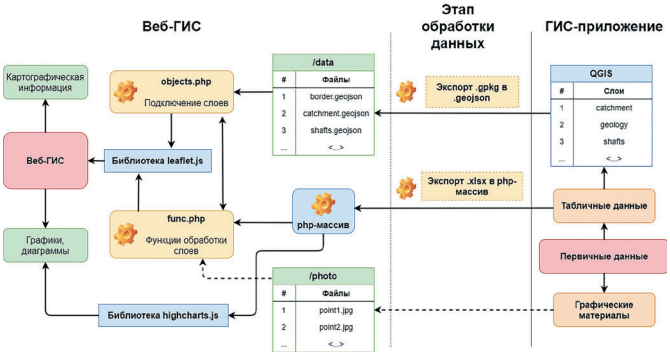

Рис. 4
Принципиальный алгоритм работы с исходными данными

Fig. 4
The basic algorithm of initial data processing

каталоги (например, */photo*). Пространственно-распределенные данные заносятся в ГИС в соответствии с заранее определенной структурой базовых слоев и атрибутивных данных (рис. 5). Часть данных большого объема, которую нецелесообразно вносить в слои ГИС, сохраняется в виде excel-таблиц. Например, данные гидрохимического опробования водных объектов Левихинского рудника хранились в .xlsx формате excel-таблиц и автоматически импортировались веб-сервером, что позволило удобно взаимодействовать с данными пользователям, не имеющим глубоких знаний в программировании.

Следующим шагом является этап предварительной обработки данных. Готовые наборы рабочих слоев экспортируются из QGIS в каталог */data* в системе координат WGS-84, формате GeoJSON – открытом формате, предназначенном для хранения географических структур данных в текстовом виде. Табличные данные преобразовываются в .csv-файлы (*Comma-Separated Values*) для дальнейшей обработки сервером и преобразования в php-массивы.

Главными инструментами обработки и преобразования данных являются веб-страницы *objects.php* и *func.php,* исходный код которых написан на языке программирования php. PHP (Hypertext Preprocessor) – скриптовый язык общего назначения, применяемый для разработки веб-приложений и являющийся одним из лидеров среди языков, применяющихся для создания динамических веб-сайтов. На данных страницах выполняются логические проверки (существования файла, наличия необходимых атрибутов и т.д.), подготовка базовых слоев (определение стилей слоя, структуры наполнения характеристик всплывающего окна и т.д.) и последующее подключение к веб-карте посредством библиотеки *Leaflet.js*. Данные страницы позволяют сделать веб-ГИС динамичной, структура и наполнение которой меняется в реальном времени в зависимости от имеющихся исходных данных. Поскольку данные страницы являются главными обработчиками исходных данных, формирующих данные для веб-ГИС, в их состав может быть внедрена система авторизации пользователей, что позволит отображать различные наборы слоев в зависимости от уровня прав доступа конкретного пользователя. Например, для исследователя особенно важно иметь доступ к базовым слоям, содержащим большое количество исходных данных, тогда как для лиц, принимающих решения наиболее удобным будет

представление в виде результирующих карт. Применение php в дополнение к JavaScript необходимо ещё и потому, что хоть php, как и JavaScript, является скриптовым языком программирования, но его инструкции выполняются на стороне сервера, что позволяет обрабатывать данные, не передавая их пользователю в открытом виде. Таким образом, можно надежно защитить данные на стороне сервера (в том числе, не храня их в явном виде).

Заключение

Внедрение геоинформационного мониторинга в недропользование позволяет осуществлять эффективное управление процессами антропогенного воздействия на окружающую среду. Разумно организованная система мониторинга позволяет решать управленческие задачи и обладает экспертным потенциалом за счет следующих возможностей:

– возможности регулярной актуализации данных (вплоть до режима реального времени), её визуализации и интерпретации;

– выполнения сравнительного анализа территорий, объектов, распределения исследуемых компонентов загрязнения;

– определения и выявления долгосрочных тенденций (трендов) в миграционных процессах;

– возможности использования таких систем для принятия решений, оперативного управления и прогнозирования.

Геоинформационные системы существенно упрощают работу с пространственно-распределенными данными и их организацией. При этом немаловажным критерием при выборе и внедрении становится открытость программных продуктов, позволяющая снизить затраты на их приобретение и освоение. Также важна дифференциация предъявляемых к разным группам пользователей степени владения навыками, что приводит к логичному разделению на настольную ГИС и веб-ГИС.

Наилучшими программными продуктами в условиях современной рыночной экономики являются бесплатные программные модули с открытым исходным кодом, позволяющие тонко настраивать структуру будущей ГИС под конкретные цели и задачи. Однако важно понимать, что возникают повышенные требования к уровню квалификации оператора ГИС.

Для организации ГИС локального уровня может быть использована практически любая настольная ГИС. Предложенный в данной статье алгоритм работы с данными показывает, каким образом типизация структуры файлов и их предварительная классификация позволяют удобно переходить к веб-решениям. При этом важно, чтобы ГИС обладала возможностью экспорта в одном из обменных форматов слоев.

Использование обменных форматов данных позволяет использовать скриптовые библиотеки Leaflet и Highhcarts для визуализации карт и данных на веб-сервере. При этом в данные системы может быть интегрирована возможность получения информации в режиме реального времени [12]. Применение ГИС-технологий в геоинформационном мониторинге существенно повышает качество научных исследований, разработки инженерных решений, прогнозов и проведения оперативных мероприятий.

Список литературы

1.Kornilkov S.V., Antoninova N.Iu., Panzhin A.A., Shubina L.A., Isakov S.V. Specifying the approaches to geoinformation monitoring to assess the development dynamics of mining enterprises as natural-technological systems. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. *Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2020;(8):41–51. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-41-51

2. Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Опыт применения методов геостатистики для оценки загрязнения воздуха в районе промышленного предприятия (Средний Урал). *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2019;(S37):596–605. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-596-605

3. Смирнов А.Ю., Рыбников П.А. Поиск геохимических аномалий и определение источников загрязнения воздуха на примере промышленного предприятия (Средний Урал). В кн.: *12-е Сергеевские чтения: геоэкологические аспекты реализации национального проекта «экология». Диалог поколений: материалы междунар. науч. конф., г. Москва, 24 марта 2020 г.* М.: РУДН; 2020. С. 78–81.

4. Cannata M., Neumann J., Rossetto, R. Open source GIS platform for water resource modelling: FREEWAT approach in the Lugano Lake. *Spatial Information Research.* 2018;26(3):241–251. https://doi.org/10.1007/s41324-017-0140-4

5. Li Z. Watershed modeling using arc hydro based on DEMs: a case study in Jackpine watershed. *Environmental Systems Research.* 2014;3:11. https://doi.org/10.1186/2193-2697-3-11

6. Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Особенности цифрового описания понижений рельефа при моделировании поверхности водосборных бассейнов. *Проблемы недропользования.* 2020;(2):174–180. https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.02.174

7. Hugentobler M. Quantum GIS. In: Shekhar S., Xiong H., Zhou X. (eds) *Encyclopedia of GIS*. Springer; 2017, pp. 1695–1716. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17885-1_1064

8. Crickard P. *Leaflet.js Essentials.* UK, Packt Publishing Ltd.; 2014. 180 p. Available at: https://www.programmer-books.com/wp-content/uploads/2019/05/Leaflet.js-Essentials.pdf

9. Trilles S., Schade S., Belmonte Ó., Huerta J. Real-time anomaly detection from environmental data streams. In: Bacao F., Santos M., Painho M. (eds) *AGILE 2015. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography.* Springer; 2015. pp. 125–144. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16787-9_8

10. Biktashev T.U., Fedorov N.I., Baisheva E.Z. About the Project of the Web GIS “Electronic Atlas of Bryophytes of the Republic of Bashkortostan”. In: Bychkov I., Voronin V. (eds) *Information Technologies in the Research of Biodiversity*. Springer; 2019. pp. 80–85. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11720-7_12

11. Mishra S. *Practical highcharts with angular.* Apress, Berkeley, CA; 2020. 302 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5744-9

12. Lumbroso D., Collell M.R., Petkovsek G., Davison M., Liu Y., Goff C., Wetton M. DAMSAT: An eye in the sky for monitoring tailings dams. *Mine Water Environ.* 2021;40(1):113–127. https://doi.org/10.1007/s10230-020-00727-1

References

1. Kornilkov S.V., Antoninova N.Iu., Panzhin A.A., Shubina L.A., Isakov S.V. Specifying the approaches to geoinformation monitoring to assess the development dynamics of mining enterprises as natural-technological systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2020;(8):41–51. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-41-51
2. Smirnov A.Y., Rybnikov P.A. Experience of geostatistic methods application to assess air pollution around an industrial enterprise (the Middle Urals). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(S37):596–605. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-596-605
3. Smirnov A.Yu., Rybnikov P.A. Detection of geochemical anomalies and determination of air pollution sources using an industrial enterprise (Middle Urals) as an example. In: *12th Sergeev's Readings: geo-ecological aspects of implementing the 'Ecology' national project. Dialogue of Generations: proceedings of the International Research Conference, Moscow, March 24, 2020.* Moscow: RUDN University; 2020, pp. 78–81. (In Russ.)
4. Cannata M., Neumann J., Rossetto, R. Open source GIS platform for water resource modelling: FREEWAT approach in the Lugano Lake. *Spatial Information Research.* 2018;26(3):241–251. https://doi.org/10.1007/s41324-017-0140-4
5. Li Z. Watershed modeling using arc hydro based on DEMs: a case study in Jackpine watershed. *Environmental Systems Research.* 2014;3:11. https://doi.org/10.1186/2193-2697-3-11
6. Riabova S.A. Temporary variations of magnetotelluric function (magnetic tipper) and their possible relationship with variations of groundwater level. *Problemy nedropolzovaniya.* 2020;(2):174–180. (In Russ.) https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.02.174
7. Hugentobler M. Quantum GIS. In: Shekhar S., Xiong H., Zhou X. (eds) *Encyclopedia of GIS.* Springer; 2017, pp. 1695–1716. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17885-1_1064
8. Crickard P. *Leaflet.js Essentials.* UK, Packt Publishing Ltd.; 2014. 180 p. Available at: https://www.programmer-books.com/wp-content/uploads/2019/05/Leaflet.js-Essentials.pdf
9. Trilles S., Schade S., Belmonte Ó., Huerta J. Real-time anomaly detection from environmental data streams. In: Bacao F., Santos M., Painho M. (eds) *AGILE 2015. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer; 2015. pp. 125–144. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16787-9_8
10. Biktashev T.U., Fedorov N.I., Baisheva E.Z. About the Project of the Web GIS "Electronic Atlas of Bryophytes of the Republic of Bashkortostan". In: Bychkov I., Voronin V. (eds) *Information Technologies in the Research of Biodiversity*. Springer; 2019. pp. 80–85. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11720-7_12
11. Mishra S. *Practical highcharts with angular.* Apress, Berkeley, CA; 2020. 302 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5744-9
12. Lumbroso D., Collell M.R., Petkovsek G., Davison M., Liu Y., Goff C., Wetton M. DAMSAT: An eye in the sky for monitoring tailings dams. *Mine Water Environ.* 2021;40(1):113–127. https://doi.org/10.1007/s10230-020-00727-1

Информация об авторах

Корнилков Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор, член Академии горных наук, главный научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: kornilkov@igduran.ru

Рыбникова Людмила Сергеевна – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: luserib@mail.ru

Рыбников Петр Андреевич – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела Уральского отделения РАН; доцент кафедры инженерной экологии, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: ribnikoff@yandex.ru

Смирнов Александр Юрьевич – младший научный сотрудник лаборатории геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела Уральского отделения РАН; преподаватель кафедры геодезии и кадастров, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: alexsm94@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 08.10.2021
Поступила после рецензирования: 27.10.2021
Принята к публикации: 29.10.2021

Information about the authors

Sergey V. Kornilkov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Member of the Academy of Mining Sciences, Chief Researcher, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: kornilkov@igduran.ru

Ludmila S. Rybnikova – Doctor of Science in Geology and Mineralogy, Main Scientist Researcher Laboratory of Ecology of Mining Production, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

Petr A. Rybnikov – Cand Sci. (Geological and Mineralogical), Head of the Laboratory of Geoinformation and Digital Technologies in Subsoil Use, Institute of Mining of Ural Branch of RAS; Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: ribnikoff@yandex.ru

Alexander Yu. Smirnov – Junior Researcher, Laboratory of Geoinformation and Digital Technologies in Subsoil Use, Institute of Mining of Ural Branch of RAS; Lecturer, Department of Geodesy and Cadastres, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: alexsm94@gmail.com

Article info

Received: 08.10.2021
Revised: 27.10.2021
Accepted: 29.10.2021