

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности
Российской академии наук – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук»
(НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук
(СПбНЦ РАН)

Научный Фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному
зондированию имени Нансена»
(Фонд «Нансен-центр»)

**ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ЗЕМЛЯ И КОСМОС»
К СТОЛЕТИЮ АКАДЕМИКА РАН
К.Я. КОНДРАТЬЕВА**

СБОРНИК СТАТЕЙ

**Санкт-Петербург
2020**

Всероссийская научная конференция с международным участием «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева. 20-21 октября 2020 года, Санкт-Петербург – Сборник статей – СПб.: 2020. – 334 с.

ISBN 978-5-6044977-3-9

В сборнике докладов конференции «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева представлены результаты современных исследований системы «Солнце-атмосфера-Земля» на основе дистанционных методов зондирования со спутников, самолетов-лабораторий, беспилотных летательных аппаратов, а также наземных средств мониторинга парниковых газов, аэрозолей и облаков, ледяного покрова в Арктике. Выявлено, что климатические аномалии среднегодовой температуры в наибольшей степени проявляются в Арктике и особенно в Сибири. Представлены работы по численному моделированию взаимодействия физических и химических процессов в атмосфере, по идентификации фундаментального глобального климатического колебания, а также результаты экспериментальных исследований для решения народно-хозяйственных задач по освоению природных ресурсов и при строительстве соответствующей инфраструктуры и реализации Северного морского пути в Арктике. В докладах обсуждены вопросы применения методов дистанционного мониторинга изменений окружающей среды для нужд сельского хозяйства, проблемы, связанные с лесными пожарами, с источниками техногенных отходов и отходов, с регистрацией и прогнозированием природных и техногенных катастроф. Рассмотрены результаты исследований трансграничного переноса загрязняющих веществ в атмосфере, источники и стоки парниковых газов, результаты Пан-Евразийских Экспериментов, вопросы автоматизации и обработки спутниковых данных, проблемы экологической безопасности территорий разного масштаба и др.

Все выше перечисленные направления исследований во многом являются продолжением тех работ, которые выполнялись ранее под руководством академика РАН К.Я. Кондратьева.

Мероприятие проведено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-05-20027.

Тексты статей публикуются в авторской редакции.

ISBN 978-5-6044977-3-9



© Коллектив авторов, 2020

Программный комитет

Председатель:

Бондур Валерий Григорьевич,
вице-президент РАН, академик РАН

Заместитель председателя:

Савиных Виктор Петрович, академик РАН

Члены Программного комитета:

Бузников Анатолий Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Варотсос Костас,
профессор, Афинский национальный университет
имени Каподистрии

Зеленый Лев Матвеевич,
академик РАН, профессор,
научный руководитель ИКИ РАН

Лупян Евгений Аркадьевич,
доктор технических наук,
заместитель директора ИКИ РАН

Кондратьева Светлана Ивановна

Разумовский Владимир Михайлович,
доктор географических наук, профессор,
вице-президент РГО

Румянцев Владислав Александрович,
академик РАН,
научный руководитель ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН

Бобылев Леонид Петрович,
кандидат физико-математических наук,
директор Фонда «Нансен-центр»

Двас Григорий Викторович,
доктор экономических наук, профессор,
главный ученый секретарь СПбНЦ РАН

Инге-Вечтомов Сергей Георгиевич,
академик РАН, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Крэкнелл Артур Филип,
профессор,
университет Данди, Великобритания
Петрукович Анатолий Алексеевич,
член-корреспондент РАН, директор ИКИ РАН

Ронжин Андрей Леонидович,
доктор технических наук, профессор РАН,
директор СПб ФИЦ РАН

Филатов Николай Николаевич,
член-корреспондент РАН, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Юсупов Рафаэль Мидхатович,
член-корреспондент РАН, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ,
научный руководитель СПИИРАН

Организационный комитет

Председатель:

Тронин Андрей Аркадьевич,
доктор геолого-минералогических наук, и.о. директора НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН

Заместитель председателя:

Биненко Виктор Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор, НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН

Члены Организационного комитета:

Барталев Сергей Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ИКИ РАН

Донченко Владислав Константинович,
доктор экономических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН

Логинов Владимир Федорович,
академик Национальной академии наук Беларуси

Крапивин Владимир Федорович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, ИРЭ РАН

Смышляев Сергей Павлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
РГТМУ

Угрюмов Александр Иванович,
доктор географических наук, профессор,
РГТМУ

Белан Борис Денисович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заместитель директора ИОА СО РАН

Махура Александр Григорьевич,
кандидат физико-математических наук,
Институт исследований системы Земля-атмосфера
Хельсинкского университета

Погорельцев Александр Иванович,
доктор географических наук, профессор, РГТМУ
Покровский Олег Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
РГТМУ

Тимофеев Юрий Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, СПбГУ

Щукин Георгий Георгиевич,
доктор физико-математических наук,
заслуженный деятель науки РФ, профессор,
ВКА им. А.Ф. Можайского

Максимович Н.Г. *, Мещерякова О.Ю., Березина О.А., Деменев А.Д.

**Современные методы изучения экологической ситуации в
горнодобывающих районах
(на примере Кизеловского угольного бассейна)**

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»
Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15
*E-mail: nmax@psu.ru

В работе рассмотрено современное экологическое состояние территории ликвидированного Кизеловского угольного бассейна, а также результаты анализа многолетнего ряда спутниковых снимков, рассматриваемые как элемент системы экологического мониторинга территории. Изученный район характеризуется наличием острых эколого-гидрологических проблем, которые необходимо решать комплексными методами. Одним из эффективных инструментов оценки масштабов бедствия и эффективным способом информационного обеспечения мониторинга экологической ситуации является создание проблемно-ориентированных бассейновых геоинформационных систем и методов комплексирования пространственной информации на основе математико-картографического моделирования, а также пространственно-временной анализ, тематическое дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли. В статье рассмотрена веб-ГИС, созданная для организации мониторинга и поддержки принятия управленческих решений, направленных на улучшение экологической ситуации. Также рассмотрено предложение к разработке информационной системы, позволяющей собрать в единую базу данные, получаемые со стационарных и мобильных измерительных устройств, включая материалы дистанционного зондирования Земли, для организации оперативного мониторинга в горнодобывающих районах.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли; мониторинг; угледобыча; окружающая среда; экологическая ситуация.

**Nikolay G. Maksimovich*, Olga Yu. Meshcheriakova, Olga A. Berezina,
Artem D. Demenev**

**Modern methods for studying the environmental situation in mining areas
(on the example of the Kizel coal basin)**

Perm State University
15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia
*E-mail: nmax@psu.ru

The paper considers the current ecological state of the territory of the liquidated Kizel coal basin, as well as the results of the analysis of a long-term series of satellite images, considered as an element of the ecological monitoring system of the territory. The studied area is characterized by the presence of acute environmental and hydrological problems that need to be addressed by integrated methods. One of the effective tools for assessing the scale of a disaster and an effective way of providing information for monitoring the environmental situation is the creation of problem-oriented basin geographic information systems and methods for combining spatial information based on mathematical-cartographic modeling, as well as spatial and temporal analysis, thematic interpretation of Earth remote sensing data. The article describes the created web-GIS to organize monitoring and support the adoption of managerial decisions aimed at improving the environmental situation. They also considered a proposal to develop an information system that allows collecting data from stationary and mobile measuring devices, including Earth remote sensing materials, into a single database for organizing operational monitoring in mining areas.

Keywords: Earth remote sensing; monitoring; coal mining; environment; ecological situation.

Введение

Оперативный экологический мониторинг подразумевает систему регулярных наблюдений и прогноза изменений земной поверхности в режиме 24/7, проводимых в том числе на основе материалов космической съемки Земли. Несмотря на очевидность необходимости его проведения, он редко находит практическое применение. Это связано с рядом организационных причин, отсутствием аппаратуры, программного обеспечения получения информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые были бы связаны в единую систему.

В настоящее время применение оперативного мониторинга связано с отслеживанием возникающих природных и техногенных чрезвычайных ситуаций. Подобные информационные системы (ИС) имеют глобальный характер для всей территории РФ. Локальные проблемы, связанные с техногенной нагрузкой на окружающую среду, остаются охваченными лишь стандартной редкой сетью пунктов мониторинга.

От оперативности получения данных мониторинга зависят природоохранные управленческие решения, оповещение населения и, соответственно, качество окружающей среды. В связи с этим было предложено разработать новую ИС экологического контроля в горнодобывающих районах. В качестве пилотного участка применения данной системы предлагается территория, подверженная воздействию ликвидированных шахт Кизеловского угольного бассейна (КУБ), где происходят изливы кислых шахтных вод с опасным для окружающей среды химическим составом.

Объект и методы

КУБ, находящийся в Пермском крае РФ, является классическим примером того, как после ликвидации угледобывающих предприятий обостряются экологические проблемы. На территории этого бассейна происходит интенсивное загрязнение окружающей среды, что обусловлено также особенностями угленосной толщи. Каменный уголь здесь отличается большим содержанием серы (5,8%), представленной, главным образом, в виде пирита. Среднее содержание многих тяжелых металлов превышает среднюю концентрацию по угольным месторождениям Восточно-Европейской платформы. Другой особенностью КУБа является его интенсивная закарстованность. Карст относится к голому и покрытому типам. В зонах развития карста водопритоки в шахты в свое время достигали 2500 м³/ч. Эти факторы явились решающими при формировании больших объемов кислых шахтных вод.

Шахты КУБа в период эксплуатации были одними из самых обводненных в стране: ежегодно в реки сбрасывалось практически без очистки около 100 млн м³ загрязненных шахтных вод, содержащих большое количество сульфатов, железа, алюминия. Средний суммарный водоприток в шахты в период их работы составлял 12–14 тыс. м³/час. Химический состав шахтных вод зависит в основном от гидродинамических условий, содержания в угленосной формации серы, карбонатов и рассеянных элементов. Если содержание серы в углях превышает 4%, то в результате окисления сульфидов вода приобретает кислую реакцию (рН = 2–3) и сульфатный состав. Трещинно-карстовые воды карбонатных пород, обладающие высоким окислительным потенциалом, нейтральной средой (рН = 7,3–7,5), гидрокарбонатно-кальциевым составом и минерализацией 0,06–1,5 г/л взаимодействуют в шахтах с богатыми серой угленосными породами и преобразуются в сульфатные железисто-алюминиевые натриево-кальциевые воды с минерализацией 2,5–19 г/л. В ходе эксплуатации она возросла до 35 г/л. Постоянный и интенсивный сток шахтных вод привел к тому, что химический состав рек в период эксплуатации шахт приблизился к химическому составу шахтных вод. Малые реки до впадения в них шахтных вод имели НСО₃-Ca-Na гидрохимическую фацию, минерализацию 90–150 мг/л и близкую к нейтральной реакцию среды. Ниже по течению стока шахтных вод они приобретают сульфатный железисто-алюминиевый состав при минерализации от 640 до 6000 мг/л. Содержание сульфатов составляет от 1000 до 3700, железа – от 70 до 900, алюминия – от 11 до 160 мг/л при рН 2,5–2,9.

После закрытия и ликвидации шахтного водоотлива горные выработки стали затопливаться, и на ряде шахт происходит излив шахтных вод на земную поверхность. Величина излива из затопленных шахт составляет от 20 до 80% от объема шахтных вод во время эксплуатации.

В настоящее время существуют более 19 участков излива шахтных вод на поверхность объемом 4,6–75 млн м³ в зависимости от водности года. Сохраняются высокие концентрации двухвалентного железа (3,6 г/л), алюминия (157 г/л), марганца (35 г/л), рН изменяется от 2,4 до 3,9.

Серьезной проблемой являются также стоки с шахтных отвалов. Концентрация загрязняющих веществ в них выше, чем в водах изливов, при схожем составе. Воздействие изливов на поверхностные воды на территории КУБа уже приобрело региональный масштаб. При смешивании шахтных вод с

речными водами и увеличении рН ион Fe^{2+} дольше, чем Fe^{3+} преобразуется в осадок. Это привело к загрязнению рек на протяжении десятков километров, чего не наблюдалось при работе шахт. Воды изливов поступают в 19 рек. В р. Кизел (притоке р. Вильвы), испытывающей наибольшее негативное влияние, среднегодовое содержание железа составляет 2160 ПДК (в зимнюю межень – до 4690 ПДК), марганца – 516 ПДК. Концентрации никеля, меди и цинка также превышают предельно допустимые [4, 8].

На основе многолетнего ряда спутниковых снимков решалась задача оценки загрязнения поверхностных водотоков за многолетний период. Для этого были получены спутниковые снимки Landsat TM, ETM+ и OLI (за 1987–2017 годы), а также Sentinel-2 MSI (за 2016–2017 годы) [3].

Таким образом, угледобывающие районы характеризуются наличием острых эколого-гидрологических проблем, которые необходимо решать комплексными методами [5, 10–12]. Одним из эффективных инструментов оценки масштабов бедствия и эффективным способом информационного обеспечения мониторинга экологической ситуации является создание проблемно-ориентированных бассейновых геоинформационных систем и методов комплексирования пространственной информации на основе математико-картографического моделирования, а также пространственно-временной анализ, тематическое дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли, полевые.

Результаты

В рамках реализации проекта РГО и РФФИ полученные результаты многолетнего мониторинга были интегрированы в разработанной проблемно-ориентированной бассейновой ГИС «Геоэкологическая геоинформационная система Кизеловского угольного бассейна» (<http://kub.maps.psu.ru>) [2], основное назначение которой – организация мониторинга и поддержка принятия управленческих решений, направленных на улучшение экологической ситуации. В основу веб-ГИС КУБа положен бассейновый принцип, при котором для оценки состояния экосистем исследуемой территории используются водосборы рек. На основе ГИС были построены геофильтрационные модели и разработан комплекс рекомендуемых мероприятий по минимизации и ликвидации изливов шахтных вод [1, 6].

Разработанная веб-ГИС опубликована в открытом доступе и содержит максимально актуальную и объективную информацию об экологическом состоянии территории. Данные многолетнего мониторинга экологической ситуации на территории КУБа ранее были доступны только в ведомственных отчётах, поэтому сама по себе их публикация в открытом доступе на картографической основе является важнейшим результатом создания ГИС.

Однако данная веб-ГИС не обладает достаточной оперативностью, так как данные гидрохимических анализов отобранных проб и измеренных расходов и т.д. поступают в неё лишь через год, но она, в свою очередь, может являться основой для новой разрабатываемой ИС.

Основываясь на отечественном и зарубежном опыте [7, 9, 10, 11, 13], предлагаемая ИС будет использовать данные с дистанционных датчиков, установленных на водных объектах, и иметь систему оповещения в случае возникновения опасности, а также алгоритм обработки и анализа данных с мультиспектрального датчика в рамках бассейнового подхода, а также иметь открытый доступ для всего населения.

На территориях, подвергающихся интенсивному техногенному воздействию, необходимо проведение постоянного мониторинга состояния окружающей среды. Предлагаемая ИС позволит собрать в единую систему данные, получаемые со стационарных и мобильных измерительных устройств, включая материалы ДЗЗ, проводить их интегральный анализ, что позволит отображать реальную экологическую ситуацию исследуемых территорий, прогнозировать развитие ситуации, принимать оперативные меры по снижению негативного воздействия на окружающую среду, а также даст возможность оценить эффективность ранее используемых природоохранных мероприятий.

Предлагается использовать автономные датчики, установленные на водных объектах, измеряющие в режиме реального времени показатели основных загрязняющих веществ, и при их существенном изменении (ухудшении) проводить мультиспектральную съемку территории в основном долин рек с помощью беспилотных летательных аппаратов. Высокое спектральное разрешение этих данных позволяет (при качественно выполненной атмосферной коррекции) производить непосредственное сопоставление результатов спектрометрических измерений с данными содержания загрязняющих веществ в воде.

Полученные результаты показали, что многолетние ряды спутниковых данных могут рассматриваться как элемент системы экологического мониторинга в угледобывающих районах и успешно использоваться для оценки загрязнения рек кислыми шахтными водами и процесса деградации земель.

Наиболее информативной для оценки загрязнения поверхностных вод является разность яркости в синем и красном диапазонах спектра. На основе этих каналов предложен нормализованный разностный индекс AMWI, который может являться элементом системы экологического мониторинга поверхностных водных объектов, загрязненных кислыми шахтными водами. В связи с этим совокупность анализа данных ДЗЗ и полученной информации с датчиков позволит оценить виды и масштабы загрязнения окружающей среды.

Основные компоненты разрабатываемой ИС представлены на архитектурной диаграмме (рис.). Ее уникальность заключается в программном интегрировании данных, получаемых как со стационарных, так и с мобильных дистанционных измерительных устройств, а также их дальнейшая обработка и анализ. Прямые аналоги на отечественном рынке отсутствуют, информации о подобных комплексных системах за рубежом, доведенных до внедрения в практику, не встречено.

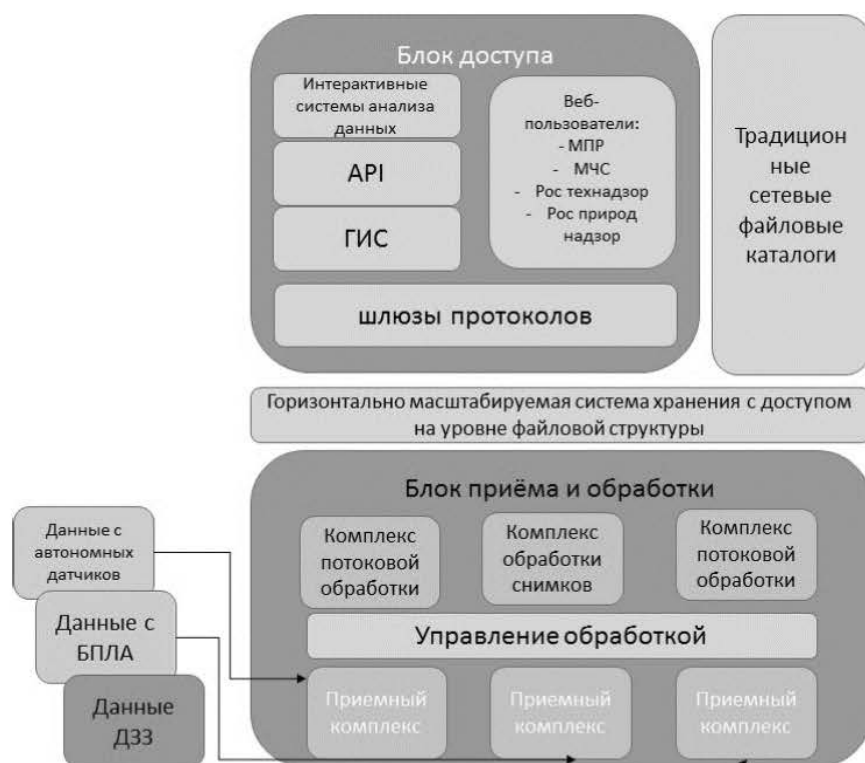


Рис. Архитектурная диаграмма информационной системы

Выводы

Существующий в настоящее время подход к проведению мониторинга окружающей среды характеризуется значительной продолжительностью проведения работ по определению ее параметров, вызванной необходимостью отбора проб, их транспортировки, хранения и проведения лабораторного анализа. В связи с этим, данные мониторинга не позволяют оперативно информировать и оповещать органы власти и население об экологической опасности, а также зачастую теряют свою актуальность в процессе принятия управленческих решений в области охраны окружающей среды. Кроме того, на проведение мониторинга в настоящее время предусмотрены значительные финансовые затраты. Применительно к КУБу мониторинг затруднен в связи с удаленностью и труднодоступностью расположения источников загрязнения водных объектов. Разрабатываемый проект направлен на повышение оперативности и эффективности при решении данных проблем в области охраны окружающей среды.

В перспективе разработанная ГИС должна не только интегрировать ранее полученные данные мониторинга, но и стать элементом самой системы мониторинга. В частности, должна быть реализована возможность максимально оперативной публикации данных измерений для принятия управленческих решений, а также для оценки эффективности природоохранных мероприятий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50073 «Микрочастицы тяжелых металлов в гидросфере промышленных районов: идентификация источников, закономерности миграции и накопления, экологический риск» и № 17-45-590793 «Применение

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Абдуллин Р.К., Березина О.А., Максимович Н.Г. Создание базы геоданных для оценки состояния окружающей среды ликвидированного Кизеловского угольного бассейна // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2018. Вып. 3. С. 3–17.
- [2] Абдуллин Р.К., Тарасов А.В., Пьянков С.В., Максимович Н.Г., Березина О.В., Сединин А.М., Шихов А.Н. Геоэкологическая база данных Кизеловского угольного бассейна. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620512, (БД, дата регистрации – 01.04.2019).
- [3] Березина О.А., Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Применение многолетних рядов данных космической съёмки для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах (на примере ликвидированного Кизеловского угольного бассейна) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 1–15.
- [4] Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения: монография. Пермь, Перм. гос. нац. исслед. ун-т. 2018. 288 с.
- [5] Тарасенко И.А. Геохимические особенности состава и закономерности формирования подземных вод в природно-техногенных гидрогеологических структурах районов ликвидированных угольных шахт. Москва: Изд-во ГЕОС, 2018. 247 с.
- [6] Berezina O., Maksimovich N., Meshcheriakova O. The Use of GIS for Minimization of the Technogenic Impact on the Environment (on the Example of the Kizel Coal Basin) // Proceedings of the V International Conference «Information Technologies in Earth Sciences and Applications for Geology, Mining and Economy» ITES&MP-2019, Moscow, Russia, 14–18 October, 2019. Moscow, 2019. p. 72.
- [7] Kopačková V. Using multiple spectral feature analysis for quantitative pH mapping in a mining environment. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 28, pp. 28–42. DOI:10.1016/j.jag.2013.10.008.
- [8] Maksimovich N., Pyankov S., Khayrulina E. Environmental assessment of closed coal mine territory using GIS analysis // Mine Water and Circular Economy, IMWA 2017. Lappeenranta, Finland, 2017. P. 212–217.
- [9] Raval S. Investigation of mine environmental monitoring with satellite based sensors. PhD. Thesis. School of Mining Engineering. The University of New South Wales, Sydney, 2011. 198 p.
- [10] Riaza A., Buzzi J., García-Meléndez E., Carrère V. and Müller A. Monitoring the extent of contamination from acid mine drainage in the Iberian pyrite belt (SW Spain) using hyperspectral imagery. Remote Sensing, 2011, 3(10), pp. 2166–2186. DOI:10.3390/rs3102166.
- [11] Riaza A., Buzzi J., García-Meléndez E., Carrère V., Sarmiento A., and Müller A. Monitoring acidic water in a polluted river with hyperspectral remote sensing (HyMap). Hydrological Sciences Journal, 2015, 60(6), pp. 1064–1077. DOI:10.1080/02626667.2014.899704.
- [12] RoyChowdury A., Sarkar D., Deng Y. et al. Mine Water Environment, 2017, 36: 248. DOI: 10.1007/s10230-016-0401-9.
- [13] Seifi A., Hosseinjanizadeh M., Ranjbar H. and Honarmand M. Identification of Acid Mine Drainage Potential Using Sentinel 2a Imagery and Field Data, Mine Water and the Environment, Article in Press, 2019. DOI:10.1007/s10230-019-00632-2.