

# Информационная система поддержки принятия решений при экоинвестиционном подходе к восстановлению природных экосистем, нарушенных в ходе освоения георесурсов

С.П. Месяц ✉, А.А. Петров

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

✉ s.mesyats@ksc.ru

**Резюме:** Концептуальный подход к восстановлению природных экосистем заключается в использовании идеи адаптивной системной организации экосистем, поскольку движущей силой эволюции является целенаправленная адаптация экосистем, базирующаяся на обратных связях, в сторону повышения их жизнеспособности и устойчивости. В Горном институте КНЦ РАН обоснована методология и разработана технология восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, в соответствии с принципом их самоорганизации, созданием биологически активной среды. Образование биологически активной среды в результате создания сеяного злакового фитоценоза без нанесения плодородного слоя – суть экоинвестиционного подхода, заключающегося в повышении энергетического потенциала системообразующей функции биоты для увеличения скорости восстановления природных экосистем. На основании принципа информационного единства природных и технических систем, позволяющего рассматривать природные экосистемы как информационно управляемые, а условия среды как управляющие факторы, разработана информационная система поддержки принятия решений при экоинвестиционном подходе к восстановлению природных экосистем, нарушенных в ходе освоения георесурсов. Информационная система интегрирует комплекс программных модулей обработки данных мониторинга динамики восстановления природных экосистем на всех этапах биологической организации горной породы и реализует взаимодействие функциональных модулей (базы данных, алгоритмы и программы обработки данных, геоинформационные компоненты), связывая их едиными информационными потоками, что обеспечивает перманентную актуализацию данных мониторинга и качество принимаемых управленческих решений при экоинвестиционном подходе к восстановлению природных экосистем, нарушенных в ходе освоения георесурсов.

**Ключевые слова:** восстановление природных экосистем, экоинвестиционный подход, информационная система, сериализация данных, георесурсы

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания №FMEZ-2022-0006 «Развитие методологии экоинвестиционного подхода к восстановлению природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов».

**Для цитирования:** Месяц С.П., Петров А.А. Информационная система поддержки принятия решений при экоинвестиционном подходе к восстановлению природных экосистем, нарушенных в ходе освоения георесурсов. *Горная промышленность*. 2024;(5S):49–53. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-49-53>

## Information system for decision support in the eco-investment approach to restoration of the natural ecosystems disrupted during development of geo-resources

S.P. Mesyats ✉, A.A. Petrov

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉ s.mesyats@ksc.ru

**Abstract:** A conceptual approach to the restoration of natural ecosystems is to use the idea of adaptive systematic organization of ecosystems, since the driving force of evolution is the purposeful adaptation of ecosystems based on feedback, oriented towards increasing their viability and sustainability. The Mining Institute of the KSC of RAS has justified a methodology and developed a technology for restoring natural ecosystems disrupted during geo-resources development, in accordance with the principle of their self-organization, the creation of a biologically active environment. Formation of a biologically active environment

as a result of establishing a seeded cereal phytocenosis without applying a fertile layer is the essence of an eco-investment approach, which consists in increasing the energy potential of the system-forming function of biota to increase the rate of restoration of natural ecosystems. A decision support information system has been developed for an eco-investment approach to restoring natural ecosystems disrupted during the development of geo-resources based on the principle of information unity of natural and technical systems, which allows us to consider natural ecosystems as information-driven, and environmental conditions as the controlling factors. The information system integrates a set of software data processing modules to monitor the dynamics of the natural ecosystems restoration at all the stages of the soil biological organization and implements the interaction of functional modules (databases, algorithms and data processing software, geoinformation components), linking them with unified information flows, which ensures the efficiency and quality of management decisions taken based on the eco-investment approach to restoration of the natural ecosystems disrupted during the development of geo-resources.

**Keywords:** restoration of natural ecosystems, eco-investment approach, information system, data serialization; geo-resources

**Acknowledgments:** The research was performed within the state assignment No. FMEZ-2022-0006 «Development of methodology for eco-investment approach to restoration of the natural ecosystems disrupted during development of geo-resources».

**For citation:** Mesyats S.P., Petrov A.A. Information system for decision support in the eco-investment approach to restoration of the natural ecosystems disrupted during development of geo-resources. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):49–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-49-53>

## Введение

Освоение природных ресурсов находится в начале всей цепи мировой экономики, в связи с этим экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли должна основываться на познании законов формирования природной среды и объективной оценке масштабов трансформации природных объектов, поскольку преобразующая деятельность человека на поверхности Земли приобрела масштабы геологических процессов. Освоив практически всю пригодную для жизни территорию Земли и все доступные ресурсы жизнеобеспечения, человеческое общество стало производить такое количество отходов, что эволюционно сложившиеся природные механизмы саморегуляции перестали с ними справляться. В ходе увеличения темпов освоения природных ресурсов перманентный процесс деградации природной среды, разрушаемой хозяйственной деятельностью человека, достиг критически опасного предела. Происходит сокращение видового биоразнообразия на всех уровнях – от генетического разнообразия внутри отдельных популяций до разнообразия видов и экосистем в биосфере, причем темпы этого разрушительного процесса возрастают [1]. Актуальность проблемы снижения негативных последствий человеческой деятельности признана на глобальном мировом уровне, в связи с этим Генеральная Ассамблея ООН провозгласила период с 2021 по 2030 г. «Десятилетием восстановления экосистем» для координации во всем мире совместных усилий по восстановлению природной среды.

Необходимость преодоления глобального экологического кризиса определяет главной интегральной проблемой, стоящей перед человечеством, проблему сохранения биосферы Земли, порожденную деградацией природной среды. Будучи междисциплинарной, эта проблема требует в первую очередь решения задачи сохранения и восстановления почвенно-растительной оболочки в свете современного знания её определяющей роли в поддержании устойчивого состояния биосферы. Почва, являясь фундаментом биосферы, обеспечивает циклический характер воспроизводства жизни на Земле.

Известная концепция «биотической регуляции природной среды», наиболее аргументированная, поскольку

проверена эволюцией, состоит в том, что возможность выживания человечества заключается в восстановлении естественной биоты в масштабах, необходимых для выполнения ею функции саморегуляции природной среды на глобальном уровне, так как допустимое потребление ресурсов биосферы уже многократно превышено [2].

Почвенная оболочка Земли – одна из самых сложных поверхностно-планетарных структур, которые вырабатываются в результате взаимодействия всех потоков вещества и энергии на поверхности суши (абиотических, биотических, экзо- и эндогенных и т.д.). Сложность функционирования почвенных экосистем определяется многофазностью, многопроцессностью, эволюционностью и полигенетическим характером, при этом почва – саморегулируемая природная система, имеющая собственные ограничения, поддерживающая динамическое равновесие за счет внутренних механизмов и буферных свойств [3].

Проблема сохранения почвенной оболочки относится к числу наиболее актуальных, в то же время трудноосуществимых задач, стоящих перед цивилизацией, поскольку почвенно-растительный покров, основной ресурс Земли, являясь средой жизнеобеспечения человека, одновременно является базисом природопользования.

Актуальность проблемы неуклонно возрастает при перманентном снижении продуктивности биосферы на фоне неконтролируемого роста производства и потребления ресурсов. Здравый смысл, опираясь на имеющиеся знания и математические расчеты, свидетельствует, что человечество будет иметь возможность для дальнейшего развития только при условии сохранения естественно-исторической биосферы и восстановления ее утраченных функций, поскольку допустимое потребление ресурсов биосферы уже многократно превышено.

## Концептуальный подход

Анализ практики восстановления нарушенных земель позволяет сделать вывод, что наиболее перспективный путь состоит в разработке решений по содействию регенерационным возможностям природной среды на основе изучения самоорганизующейся природы почв и потенциала самовосстановления каждой конкретной природной системы.

На основании анализа данных многолетнего мониторинга восстановления нарушенных земель в разных климати-

<sup>1</sup> Global Biodiversity Outlook 2. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Montreal. 2006. Available at: <http://www.biodiv.org/gbo2/default.shtml> (accessed: 10.05.2024).



**Рис. 1**  
Структура информационной системы поддержки принятия решения при экоинвестиционном подходе к восстановлению природных экосистем, нарушенных в ходе освоения георесурсов

**Fig. 1**  
Structure of the information system for decision support in the eco-investment approach to restoration of the natural ecosystems disrupted during development of geo-resources

ческих зонах, на различных объектах в Горном институте КНЦ РАН обоснована методология и разработана технология восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, в соответствии с принципом их самоорганизации, созданием биологически активной среды. Образование биологически активной среды в результате создания сеяного злакового фитоценоза без нанесения плодородного слоя – суть экоинвестиционного подхода, заключающегося в увеличении энергетического потенциала системообразующей функции биоты для повышения скорости восстановления природных экосистем.

С целью изучения процессов биологической организации горной породы в соответствии с концепцией естественного почвообразования (по В.И. Докучаеву – почва есть продукт взаимодействия материнской (горной) породы, биоты, климата, рельефа и времени) разработана система мониторинга нарушенных земель при экоинвестиционном подходе к их восстановлению, предусматривающая комплексное и одновременное изучение генетических параметров и функциональных показателей формирующихся почвенно-растительных систем, в ходе многолетнего мониторинга.

Мониторинговые полигоны определены на объектах складированных отходов рудообогащения Хибинской группы месторождений апатитсодержащих руд и Ковдорского месторождения бадделит-apatит-магнетитовых руд, характеризующихся наибольшим проявлением факторов, лимитирующих процессы самозарастания: мелкодисперсность и бесструктурность субстрата, отсутствие органического вещества и элементов питания растений, низкая влагоемкость, сильные проявления ветровой и водной эрозии.

Для поддержки принятия решений при экоинвестиционном подходе к восстановлению природных экосистем, нарушенных в ходе освоения георесурсов, разработана информационная система, интегрирующая комплекс ал-

горитмов и программных средств, реализующих методы генерализации информации, изучения связей параметров мониторинга и комплексной интерпретации данных. В составе информационной системы сформированы базы данных состояния нарушенных земель и факторов, лимитирующих их самовосстановление, способов оптимизации биопродукционного процесса и мониторинга восстанавливаемых земель (рис. 1).

**Обсуждение результатов**

Информационная система формирует комплекс программных модулей хранения и обработки данных мониторинга динамики восстановления природных экосистем на всех этапах биологической организации горной породы. Её базы данных содержат информацию о различных аспектах этого процесса: состояние и ресурсный потенциал самовосстановления нарушенных при освоении георесурсов земель, динамика накопления органического вещества, функциональные показатели и генетические параметры образующихся почв, геоботаническое описание фитоценоза, формирующегося на лесной стадии сукцессии сеяного без нанесения плодородного слоя злакового фитоценоза, морфофизиологические характеристики растений-доминантов окружающей природной среды в формирующемся фитоценозе [4; 5].

Модель взаимодействия программных модулей информационной системы основана на концепции клиент-серверной архитектуры веб-приложений<sup>2</sup>. При разработке веб-компонентов информационной системы применялся технологический стек MERN – комплексная среда для создания веб-приложений на основе языка программирования JavaScript<sup>3</sup>. В структуру MERN входят четыре компонента: СУБД MongoDB – реализует документированную модель данных информационной системы, фреймворк Express – обеспечивает механизм роутинга http-запросов между компонентами информационной системы, JavaScript библиотека React – обеспечивает функциональность и интерактивность веб-интерфейса компонентов информационной системы, кроссплатформенная среда исполнения Node.js – реализует событийно-ориентированное и асинхронное программирование с неблокирующим вводом/выводом, обеспечивая высокую производительность веб-компонентов информационной системы.

При исследовании, проектировании, опытно-промышленных испытаниях, многолетнем мониторинге объектов накапливается большой объем информации, поступающей от специалистов различного профиля. Решение задач обмена предметно-ориентированными данными между функциональными модулями информационной системы на различных этапах разработки технологических решений обеспечивается стандартным форматом импорта-экспорта данных на основе технологии XML<sup>4</sup>.

С использованием языка «XML Shema» для каждого класса объектов инфологических моделей баз данных создана схема XML-документа, представляющая потоки данных между модулями информационной системы в виде наборов тегов в XML-файлах или полей в таблицах баз данных. После проверки документа на соответствие XML-схеме программа создает модель информационного объекта, ко-

<sup>2</sup> Types of Web Application Architectures. Available at: <https://www.altexsoft.com/blog/web-application-architecture-how-the-web-works/> (accessed: 20.06.2024).

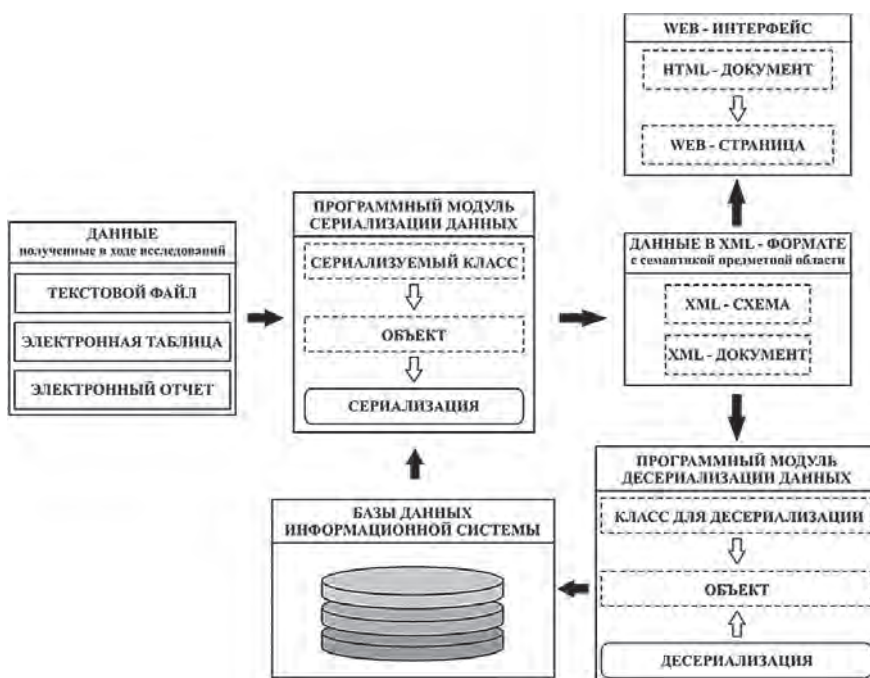
<sup>3</sup> What Is the MERN Stack? Guide & Examples. Available at: <https://www.oracle.com/database/mern-stack/> (accessed: 10.05.2024).

<sup>4</sup> Extensible Markup Language. Available at: <http://www.w3.org/xml/> (accessed: 10.05.2024).



торая включает словарь (названия элементов и атрибутов), структуру содержания (отношения между элементами и атрибутами) и типы данных. Каждый элемент в этой модели ассоциируется с определённым типом данных, позволяя формировать объект, соответствующий структуре XML-документа, что дает возможность средствами объектно-ориентированного программирования упростить разработку программных модулей, отвечающих за интеграцию баз данных в информационную систему.

Представление данных в XML-формате с семантикой предметной области, в которой функционирует информационная система, позволяет структурировать потоки разноформатных данных, обеспечить их обработку и хранение. На основе разработанных схем XML-документов осуществляется трансформирование выходящей информации в наиболее распространенные форматы электронного документооборота для наглядного представления результатов обработки данных. Наличие такой функции в информационной системе обусловлено необходимостью реализации программных средств интерактивного доступа к данным через веб-интерфейсы (рис. 2).



**Рис. 2**  
Реализация механизмов интеграции баз данных в структуре информационной системы поддержки принятия решения при восстановлении природных экосистем

**Fig. 2**  
Implementation of the mechanisms to integrate the databases into the structure of the information system for decision support in restoration of the natural ecosystems

В составе информационной системы разработан программный модуль автоматизированного анализа способов оптимизации биопродукционного процесса на основе данных о состоянии нарушенных земель, лимитирующих факторов их самовосстановления, и данных мониторинга восстанавливаемых земель, обеспечивающий поддержку принятия решений при экоинвестиционном подходе к восстановлению природных экосистем, нарушенных в ходе освоения георесурсов.

Так как самовосстановление нарушенных при освоении георесурсов земель протекает медленно по причине нали-

чия лимитирующих факторов или не происходит вообще, анализ существующих способов оптимизации биопродукционного процесса для конкретного объекта должен определять именно тот способ, который обеспечивает решение целевой задачи – восстановление природных экосистем.

Механизм анализа, реализованный в программном модуле информационной системы, предполагает соотношение содержимого баз данных состояния нарушенных земель и способов оптимизации биопродукционного процесса в области их пересечения по факторам, лимитирующим процессы самовосстановления нарушенных земель. Обратные связи в соответствии с концептуальным подходом к восстановлению природных экосистем обеспечиваются данными мониторинга восстанавливаемых земель с корректировкой способов оптимизации биопродукционного процесса в случае необходимости посредством интерактивного взаимодействия с данными информационной системы [6].

Работу алгоритма программного модуля можно описать на примере мониторингового полигона складированных отходов рудообогатителя Хибинской группы месторождений,

которые характеризуются следующими лимитирующими факторами: «эрозионные процессы» – ветровая, водная эрозия, «органическое вещество» – отсутствует, «элементы минерального питания» – отсутствуют, «токсичность» – нетоксичен, «агроклиматические условия» – непродолжительный холодный вегетационный период.

База данных информационной системы поддержки принятия решений содержит информацию о различных способах оптимизации биопродукционного процесса, в том числе и о тех, которые могут быть применены для рассматриваемого случая с полным отсутствием органического вещества. Далее алгоритм на основе анализа данных мониторинга динамики восстановления природных экосистем выбирает наиболее подходящий способ повышения биопродуктивного уровня нарушенных земель для исследуемого объекта. Если алгоритм определяет множественный выбор,

в этом случае на принятие решения влияет экономический фактор. В случае если решение вовсе не будет найдено, то алгоритм идентифицирует ситуацию о неполноте исходных данных для принятия решения, предлагая пользователю дополнить и/или скорректировать информацию в базах данных средствами интерактивного взаимодействия с информационной системой через интерфейсный компонент веб-приложения.

Дальнейшее развитие информационной системы во многом зависит от полноты и актуализации баз данных мониторинга исследуемых объектов. Качество выборки оптимальных решений при восстановлении природных экосистем, нарушенных в ходе освоения георесурсов, находится в прямой зависимости от объема анализируемой информации, её полноты, релевантности, объективности и актуальности. При накоплении достаточного объема данных в структуру базы знаний информационной системы целесообразно включить механизмы анализа данных на основе технологий искусственного интеллекта и реали-

зовать алгоритмы машинного обучения, что позволит информационной системе, обрабатывая данные мониторинга, выявлять закономерности и формировать прогнозы о состоянии исследуемых объектов.

### Заключение

Восстановление природных экосистем представляет исключительный интерес для науки и практики, поскольку техногенные ландшафты являются зонами современной регенерации почвенно-растительного покрова, главного компонента биосферы. Вновь образующиеся почвы – это почвы с точно фиксируемым возрастом и стадией развития, так как нарушенные земли горнодобывающей отрасли представлены в основном складированными отходами добычи и переработки минерального сырья, т.е. горной породой в чистом виде без органики растительного происхождения.

В современном мире при соответствии общему направлению на экологизацию промышленного производства актуальна разработка методо-цифровых подходов к изучению проблем восстановления природных экосистем.

На фоне глобального экологического кризиса при освоении арктических регионов, природная среда которых характеризуется низким потенциалом самовосстановления, целесообразность применения экоинвестиционного подхода к восстановлению природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, не вызывает сомнений.

Применение экспертных систем в вопросах оптимизации экологического состояния горнопромышленных регионов арктической зоны позволяет специалистам повысить оперативность и качество принимаемых управленческих решений при восстановлении природных экосистем, нарушенных в ходе освоения георесурсов.

### Список литературы / References

1. Mesyats S., Ostapenko S., Melnikov N. Conceptual approach to solving desertification problem. In: *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, Bulgaria, 30 June – 6 July, 2016*. Book 5, vol. 2, pp. 171–178.
2. Вернадский В.И. *Научная мысль как планетное явление*. М.: Наука; 1991. 270 с.
3. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. *Сохранение почв как незаменимого компонента биосферы: функционально-экологический подход*. М.: Наука; Наука/Интерпериодика; 2000. 184 с.
4. Mel'nikov N.N., Mesyats S.P., Volkova E.Yu. Methodological approach to restoration of ecosystem functions in the industrial lands. *Journal of Mining Science*. 2016;52(2):410–416. <https://doi.org/10.1134/S1062739116020586>
5. Mesyats S.P., Gontar O.B. Studying the dynamics of restoration of natural ecosystems disturbed by the development of georesources in accordance with the principle of their selforganization. In: *21st International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021, 16–22 August, 2021*. Vol. 21, Book 7.2, pp. 461–468. <https://doi.org/10.5593/sgem2021/5.1/s20.058>
6. Месяц С.П., Петряшева Е.М., Бурков Е.В. Информационное обеспечение адаптивных технологий восстановления нарушенных земель горного производства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(10);180–185. Mesyats S.P., Petryasheva E.M., Burkov E.V. Dataware support for adaptive technologies for disturbed soil restoration after mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;(10);180–185. (In Russ.).

#### Информация об авторах

**Месяц Светлана Петровна** – ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук; г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9929-8067>; e-mail: s.mesyats@ksc.ru

**Петров Алексей Александрович** – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук; г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8283-9288>; e-mail: a.petrov@ksc.ru

#### Information about the authors

**Svetlana P. Mesyats** – Leading Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9929-8067>; e-mail: s.mesyats@ksc.ru

**Aleksey A. Petrov** – Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8283-9288>; e-mail: a.petrov@ksc.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.08.2024

Поступила после рецензирования: 09.10.2024

Принята к публикации: 12.10.2024

#### Article info

Received: 03.08.2024

Revised: 09.10.2024

Accepted: 12.10.2024