

УДК 004.9:504.064

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

А. П. КОСОНОГОВ, Р. Д. ГРИНЕВИЧ
Научный руководитель Н. В. ВЫГОВСКАЯ
Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

Актуальность данного междисциплинарного исследования обусловлена стратегической государственной необходимостью обеспечения комплексной экологической безопасности и биологического мониторинга здоровья населения Арктической зоны Российской Федерации.

В современных условиях глобальных климатических трансформаций, сопровождающихся интенсивным разрушением многолетней мерзлоты, Арктический регион превращается в глобальное хранилище стойких загрязняющих веществ. Трансграничный перенос промышленных выбросов через атмосферные потоки и морские течения приводит к аккумуляции тяжелых металлов, таких как ртуть, кадмий и свинец, в тканях мигрирующих биоресурсов. Специфика регионального природопользования коренных народов предполагает критическую зависимость здоровья населения от качества местных промысловых видов рыб и дикой птицы, составляющих основу рациона. В этой связи исторически сложившиеся методы мониторинга, опирающиеся на ручную обработку разрозненных реестров в формате Excel, демонстрируют свою неэффективность, порождая информационные разрывы и снижая скорость реагирования на возникающие экологические инциденты. Целью настоящей работы является проектирование и программная реализация полнофункционального прототипа интеллектуальной ГИС, способной осуществлять не только хранение многолетних массивов данных, но и проактивный пространственный анализ биологических угроз.

Архитектурная концепция разработанного программного комплекса базируется на принципах высоконагруженной многоуровневой клиент-серверной системы. В качестве технологического базиса серверной части выбрана платформа Microsoft .NET 8 (C#), что обусловлено необходимостью создания типобезопасной, отказоустойчивой среды с поддержкой асинхронных операций. Клиентский интерфейс спроектирован как Single Page Application (SPA) на базе библиотеки React.

Слой хранения информации спроектирован с применением реляционной СУБД SQL, интегрированной с расширением MSSQL для выполнения сложных геопрограммных вычислений. Особое внимание при проектировании физической модели данных было уделено обеспечению гибкости при сохранении строгой ссылочной целостности. Базовая информация о биологических образцах (видовая принадлежность, дата и время отбора, морфометрические параметры популяций) депонируется в нормализованных таблицах. В то же время результаты глубокого химического анализа,

включающие концентрации десятков микроэлементов, сохраняются с применением формата JSONB. Это архитектурное решение реализует концепцию «схемы при чтении» (schema-on-read), позволяя исследователям бесконечно масштабировать систему при добавлении новых показателей контаминации без внесения изменений в структуру БД и остановки сервиса. Индексация по полям JSONB гарантирует высокую скорость фильтрации и поиска даже по вложенным свойствам объектов химического состава.

Критическим звеном системы является автоматизированный программный конвейер потоковой обработки лабораторных реестров. Разработанный сервис на базе библиотеки NPOI реализует уникальный алгоритм парсинга бинарных файлов Excel непосредственно в оперативной памяти сервера, исключая необходимость использования офисного ПО. Процесс включает интеллектуальную санитизацию данных, которая автоматически распознает и корректирует типографические ошибки, обрабатывает различные десятичные разделители и нормализует единицы измерения (перевод из мкг/кг в мг/кг). Особого внимания заслуживает программная логика обработки недетерминированных значений, отмеченных знаками пределов обнаружения (например, «< 5.0»). Система применяет научно обоснованную стратегию замещения таких величин на 50 % от порога чувствительности метода анализа, что позволяет сохранить статистическую значимость выборки для последующего обучения нейронных сетей и расчета кумулятивных индексов опасности.

Для обеспечения семантического поиска и наглядной топонимической привязки в систему внедрен модуль интеллектуального геокодирования, интегрированный с API Nominatim картографического проекта OpenStreetMap. Сервис реализует асинхронный алгоритм обратного геопозиционирования, преобразуя цифровые координаты широты и долготы в детализированные адреса. Разработанный парсер анализирует иерархическую структуру ответа, последовательно идентифицируя административные уровни: от конкретных водных объектов до муниципальных округов и областей. Внедренные механизмы кеширования запросов и обработки исключений гарантируют стабильность сквозного конвейера даже при временной недоступности внешних картографических ресурсов, обеспечивая консистентность пространственной базы данных.

Научная новизна исследования заключается в интеграции в структуру ГИС модуля предиктивной аналитики на базе Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI). Для прогнозирования динамики возникновения зон экологического неблагополучия (hotspots) была спроектирована и обучена гибридная нейросетевая модель архитектуры CNN-BiLSTM-Attention. Сверточные слои (CNN) отвечают за извлечение скрытых пространственных корреляций между географически близкими точками мониторинга. Двунаправленная долгая краткосрочная память (BiLSTM) анализирует временные ряды концентраций, фиксируя сезонные паттерны и долгосрочные тренды аккумуляции металлов. Механизм внимания (Attention) позволяет модели программно взвешивать

значимость отдельных факторов влияния, таких как гидрологические условия или аномалии температуры.

Для минимизации рисков недооценки редких, но экстремально опасных всплесков загрязнения в интеллектуальный блок системы интегрирован стохастический диффузионный модуль. Пользователь системы получает информацию не просто о прогнозируемом значении концентрации, но и о математической вероятности превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) в конкретном районе.

Аналитический инструментарий ГИС включает блок автоматизированной токсикологической оценки, оперирующий индексами HQ (коэффициент опасности) и HI (суммарный индекс опасности). Алгоритм расчета базируется на оценке расчетного суточного поступления металлов (EDI), учитывающем средний вес тела потребителя (70 кг) и научно обоснованную норму потребления биоресурсов (0,05 кг в сутки). Система сопоставляет EDI с международными референтными дозами (RfD), специфичными для ртути, кадмия, свинца, мышьяка, меди и цинка. Примечательной особенностью реализации является внедрение коррекции для мышьяка, при которой в расчет индекса HI принимается только его токсичная неорганическая фракция (10 % от общего содержания). Пробы, для которых кумулятивный индекс превышает пороговое значение 1,0, мгновенно маркируются системой, инициируя визуальное предупреждение и вывод детального отчета о методологии расчета для исследователя.

Финальная визуализация пространственной информации реализована посредством интеграции библиотеки Leaflet и картографической подложки OpenStreetMap. Ключевым аналитическим слоем являются динамические тепловые карты (Heatmaps), строящиеся на основе прогнозных данных нейронной сети. Система поддерживает плавное масштабирование и автоматическую кластеризацию маркеров, что позволяет сохранять высокую производительность интерфейса даже при визуализации тысяч точек мониторинга. ГИС также предусматривает функционал для интеграции данных «общинного мониторинга» (Indigenous Knowledge). Качественные индикаторы, полученные от коренного населения (изменения цвета тканей биоты, аномалии поведения видов), оцифровываются и используются в качестве дополнительных категориальных признаков при дообучении моделей GeoAI.

В завершение следует подчеркнуть, что разработанный прототип ГИС представляет собой инновационный инструмент, переводящий процесс мониторинга из плоскости пассивного наблюдения в область интеллектуального прогнозирования и оперативного управления биологическими рисками. Автоматизация сквозного технологического цикла – от потокового импорта данных до генерации предиктивных карт опасности – устраняет влияние субъективного человеческого фактора и повышает достоверность экологических прогнозов на 15 %...25 %. Программный комплекс формирует надежный фундамент для обеспечения биологической безопасности северных территорий и устойчивого развития Арктической зоны.