Оценки риска в ИИС контроля экологического состояния территориальных объектов

В. В. Алексеев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

vvalekseev@etu.ru

В. С. Брызгало

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

verabryzgalo@mail.ru

Н. В. Орлова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

nvorlova@etu.ru

А. К. Чикин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

chikin.andrey99@yandex.ru

Аннотация. **В статье рассматривается распределенная информационно-измерительная система (РИИС) для экологического мониторинга территориальных объектов, ориентированная на раннее обнаружение аварийных ситуаций. Особое внимание уделено алгоритмическому обеспечению, позволяющему на основе данных с датчиков формировать комплексные нормированные оценки состояния окружающей среды. Предложен вероятностный подход к обоснованию требований к метрологическим характеристикам средств измерений, минимизирующий риск пропуска аварийных ситуаций. Описана структура базы геоданных, интегрирующей пространственную, атрибутивную и измерительную информацию для поддержки принятия управленческих решений. Приведен пример реализации системы для оценки риска загрязнения атмосферного воздуха на территории Колпинского района.**

Ключевые слова: информационно-измерительная система, экологический мониторинг, средства измерений, неопределенность измерений, нормированный индекс воздействия, аварийная ситуация, оценка риска

I. Введение

В соответствии с положениями Федерального закона об охране окружающей среды [1], на промышленных предприятиях в обязательном порядке внедряются информационно-измерительные системы (ИИС). Данные комплексы позволяют вести постоянный мониторинг экологического воздействия в режиме реального времени: они отслеживают объемы выбросов вредных веществ в атмосферу, оперативно выявляют факты нарушения установленных лимитов и отправляют эти сведения в центральную информационную систему для дальнейшей обработки.

Разрабатываемая в данной работе распределенная информационно-измерительная система (РИИС) и алгоритмы обработки измерительной информации позволяют не только фиксировать текущие концентрации загрязняющих веществ и выявлять превышения нормативов, но и формировать комплексные нормированные показатели состояния атмосферного воздуха с учетом неопределенности измерений. Наличие количественных данных о фактическом загрязнении и вероятностных характеристик его обнаружения создает основу для перехода к следующему этапу — оценке риска, обусловленного природными и техногенными воздействиями.

Оценка риска техногенного воздействия на природную среду связана с контролем величины информативных параметров, определяющих величину воздействия (возможного нанесенного ущерба), вероятность наступления аварийной ситуации. В статье анализируются типовые виды воздействия: химических, физические и биологические и др. На примере загрязнения атмосферного воздуха рассмотрена методология оценки, включающая идентификацию опасных веществ, анализ экспозиции, оценку зависимости «доза–ответ» и характеристику риска.

Одной из главных природоохранных проблем выступает загрязнение воздуха: оно оказывает воздействие на здоровье людей, биологическое разнообразие и климатические системы. Использование методологии оценки риска позволяет не только измерить и охарактеризовать уровень угрозы, но и обосновать меры, необходимые для ослабления негативных последствий.

Процедура оценки риска загрязнения атмосферы включает несколько этапов, которые подробно описаны в статье [2]. Каждая характеристика может быть представлена в виде слоя в геоинформационной технологии, поддерживаемого соответствующей базой данных и программой её формирования и использована для оценки величины возможного нанесенного ущерба, степени риска и прогнозирования (предупреждения) аварийной ситуации.

II. ИИС КОНТРОЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Современные РИИС представляют собой набор измерительных подсистем, размещенных в местах выброса в атмосферу, сброса в водные объекты, и других видов воздействия на окружающую среду, которые обеспечивают контроль всех параметров в соответствии с российскими и международными стандартами.

Проводимый с использованием ИИС экологический мониторинг позволяет также вычислить оценку риска развивающихся территорий, подверженных воздействию опасных природных процессов и их взаимодействию с техногенными объектами.

В статье [3] предложен подход к построению информационно-измерительных систем контроля состояния окружающей среды на основе понятия «функциональный геотаксон» — территориальной единицы, обладающей определенными характеристиками, информативными для решаемой задачи оценки степени воздействия на окружающую природную среду. Данный подход обеспечивает контроль, анализ и поддержку управляющих решений в автоматическом режиме для сложных территориальных систем, включая трехмерные функциональные процессы в природных и техногенных объектах.

Объектом контроля является территориальная система – функциональный геотаксон (ФГТ – цифровая модель), описывающий структуру контролируемой территории.

Система включает следующие основные компоненты:

1. Сенсорные модули (датчики) – измерительные устройства, регистрирующие физико-химические и биологические параметры окружающей среды (концентрации загрязняющих веществ, уровень шума, радиационный фон, температуру, влажность и др.). Датчики должны обладать требуемыми метрологическими характеристиками (сертификат качества).

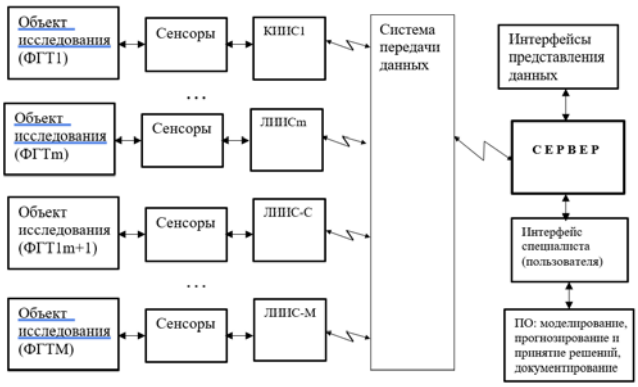

Рис. 1. Обобщенная структура РИИС

2. Локальные и компактные ИИС (ЛИИС, КИИС), размещенные в точках воздействия, встроенные в технологический процесс – компактные, или размещенные на территории источника воздействия – локальные, которые обеспечивают опрос измерительных датчиков в соответствии с расписанием (требованиями дискретизации контролируемых физических величин), накопление результатов измерений в виде протоколов и базы данных, предварительный анализ. ЛИИС могут быть стационарными (ЛИИС-С) и мобильными (ЛИИС-М).

3. Каналы связи (проводные, беспроводные, спутниковые), выступающие в роли передающего звена и обеспечивающие доставку данных на серверы мониторинга.

4. Централизованный узел обработки и накопления информации (серверные ресурсы и базы данных), где реализуется длительное хранение, статистический анализ и визуализация сведений.

5. Программно-алгоритмический комплекс аналитики и прогнозирования, включающий методы количественной оценки вероятного ущерба и уровня опасности, цифровые модели динамики аварийных процессов, а также инструментарий поддержки принятия решений.

6. Средства визуализации и доступа к данным — веб-интерфейсы, мобильные клиентские приложения, программные интерфейсы (API) для сопряжения с иными платформами экологического мониторинга.

Современные информационно-измерительные системы контроля воздействия на окружающую среду позволяют ведеть высокоточные непрерывные наблюдения, что обеспечивает оперативность управленческих решений и позволяет сокращать экологический ущерб.

III. ОПРЕДЕНИЕ РИСКА РАЗВИВАЮЩИХСЯ ТЕРРИТОРИЙ

Риск – величина возможного нанесенного ущерба на развивающей территории, умноженная на вероятность возникновения воздействия (воздействующего события)

$$R = PW,$$

где P – вероятность возникновения опасного события, которая зависит от вида технологического процесса, производства P=f(ТП); W – возможный нанесенный ущерб, который зависит от типа геотаксона G или нескольких геотаксонов Gk, на которые оказывает воздействие указанное опасное событие; W = f(G, M, S); M – масса выброса в атмосферный воздух или сброса в водные объекты суши; S – объем ущерба и стоимость восстановительных работ.

Масса вредных веществ определяется объемом V и концентрацией C их выброса или сброса M=f(V, C).

На рис. 3 представлена расчетная схема возможного нанесенного ущерба в геоинформационной технологии.

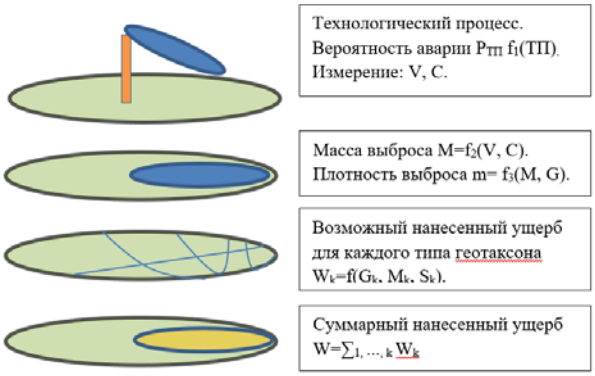

Рис. 2. Последовательность определения суммарного нанесенного ущерба в геоинформационной технологии (расчет по слоям)

Показатели потенциальной опасности и интегральные оценки, формируемые на основе административного и функционального районирования, требуют количественного выражения, позволяющего сопоставлять разнородные по своей природе факторы воздействия. Реализация такого подхода невозможна без решения задачи объединения данных, имеющих различную физическую природу, размерность и масштаб. Поэтому возникает необходимость обращения к метрологическим основам построения комплексных оценок.

В зависимости от природных, экономических и технических особенностей территории на заданном геотаксоне могут возникать различные аварийные ситуации, приводящие к неодинаковому по масштабу ущербу.

Опасное воздействие может иметь различную природу. Целесообразно объединить функциональные геотаксоны (ФГТ) в группы по типу воздействия (техногенному или природному), по возможному ущербу и по необходимым затратам на восстановление. В результате формируется множество классов — библиотека функций:

$$GF = \{G1 \rightarrow W1 = f1\ (x1),\ G2 \rightarrow W2 = f2\ (x2),\ \ldots,\ Gk \rightarrow Wk = fk\ (xk)\},$$

где Gk – класс ФГТ, xk – контролируемый (анализируемый) параметр, fk – цифровая модель ФГТ.

Одной из важнейших задач создаваемой ИИС является контроль протекания процессов, измерение значений информативных параметров, анализ, обнаружение предаварийной ситуации и предотвращение аварии.

По результатам контрольных измерений ИИС определяет вероятность наступления аварийной ситуации.

IV. Нормированные шкалы. Простые и сложные оценки

Объединение разнородных данных для получения единой оценки состояния объекта может быть выполнено на метрологической основе путём приведения различных характеристик к нормированной шкале, что обеспечивает их сопоставимость.

Любая оценка контролируемого параметра, обладающая метрологической характеристикой и отражающая анализируемый показатель качества, может быть преобразована к нормированной шкале качественных отношений и представлена в виде интервалов с условными градациями:

$$x^*_{\text{тθ}} = \{\text{НТ, ЗН, НН, Н, ВН, ЗВ, ЧВ}\},$$

где числовые коридоры соответствуют:

0–1 — нулевое значение (НТ),

1–2 — значительно ниже нормы (ЗН),

2–3 — ниже нормы (НН),

3–4 — норма (Н),

4–5 — выше нормы (ВН),

5–6 — значительно выше нормы (ЗВ),

6–7 — чрезвычайно высокая оценка (ЧВ).

Все возможные значения рассматриваемой характеристики размещаются в интервале от 0 до 1. При этом принадлежность результата контроля к тому или иному интервалу качественной шкалы может трактоваться как вероятность попадания измеренного значения в соответствующий коридор.

На рис. 3 представлен график функций с установленными интервалами результатов.

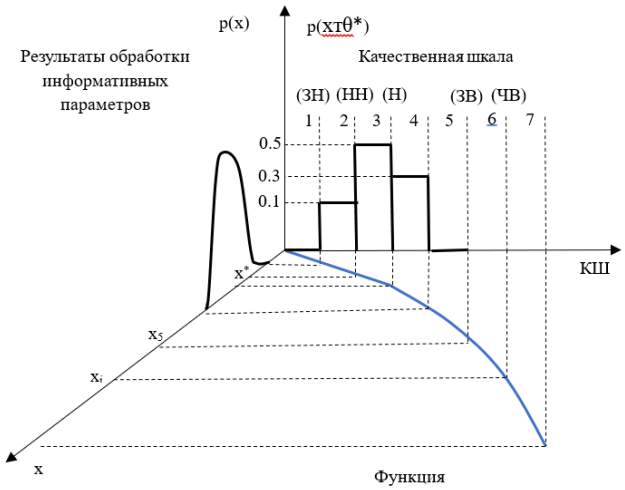

Рис. 3. Плоскость соответствия результата количественных значений

Исходными данными для формирования оценок служат результаты измерений, поступающие с датчиков (концентрации загрязняющих веществ, данные исследований и т.д.). В статье [4] приведены классы опасности загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, а также рассматривается индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), который рассчитывается по пяти веществам с наибольшими концентрациями на исследуемой территории с учётом их класса опасности.

Для получения итоговой оценки состояния территории, объекта или системы в целом необходимо представить все измерения загрязняющих веществ в унифицированном виде, допускающем их объединение.

Сложная оценка может формироваться путём суммирования нормированных параметров, взвешенных в соответствии с их значимостью:

$$O_1 = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\alpha_k x_k,$$

где α_k – коэффициент значимости суммируемого параметра, должен удовлетворять требованию $\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\alpha_k = 1,$ или выражением

$$O_1 = \left(\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\right)^{-1}\sum_{k=1}^{n}\alpha_k x_k,$$

в последнем случае коэффициент α_k может быть любым положительным числом.

Граничные значения качественной шкалы определяются по данному выражению на основе соответствующих граничных значений параметров.

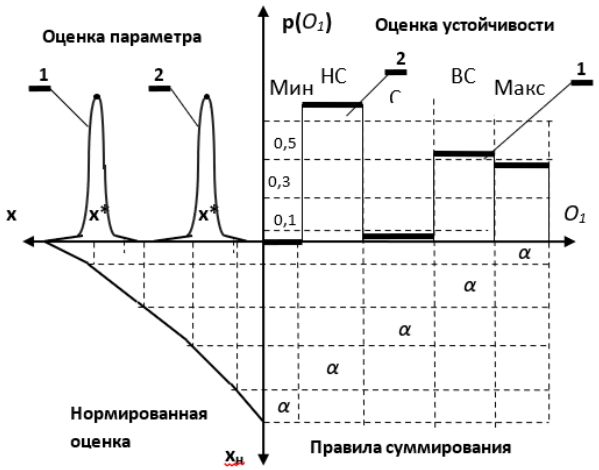

Рис. 4. Пример нормирования контролируемых параметров

На рис. 4 приведён пример приведения параметров к нормированной шкале. Параметр, обозначенный цифрой «1» (на графике показаны закон распределения оценки и гистограмма на качественной шкале), находится вблизи границы между интервалами и имеет высокую вероятность попадания в два соседних класса. Параметр под номером «2» практически полностью соответствует одному классу устойчивости — «НС». Каждое значение оценки характеризуется точностью ее получения x* + gσx.

При формировании интегральной оценки O_1 значения частных показателей суммируются вместе с их случайными составляющими погрешности:

$$O_1 = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\alpha_k(x_k \pm g\sigma_x).$$

Таким образом, при построении нормированной шкалы и формулировании требований к получаемым оценкам необходимо обеспечить их сопоставимость — интервалы шкалы должны быть не менее 2 gσx. Это особенно важно для параметров, у которых одна из границ не определена.

V. Практическая реализация оценки риска

В качестве примера для проведения экологического мониторинга с оценкой риска и построения визуализации на географической основе была взята территория Колпинского района Ленинградской области, которая включает в себя:

- несколько промышленных предприятий с выбросами вредных веществ разных уровней опасности;
- автомагистрали и ж/д пути;
- автоматические станции мониторинга загрязнения атмосферного воздуха Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности, откуда берутся актуальные данные о выбросах загрязняющих веществ; [5]
- лесные массивы, компенсирующие выбросы загрязняющих веществ.

Для примера был проведен расчет выбросов формальдегида с Ижорских заводов (металлургия), согласно методам расчета максимальной разовой концентрации загрязняющих веществ для каждого точечного источника, где Cm – максимальная разовая концентрация загрязняющих веществ (ЗВ) зависит от следующих параметров:

A – коэффициент стратификации (зависит от климатической зоны);

M – мощность выброса, г/с;

F – коэффициент оседания ($F = 1$ для газов);

m, n– безразмерные коэффициенты, учитывающие параметры выброса;

η – коэффициент рельефа;

H – высота трубы, м;

V1 – расход газовоздушной смеси, м³/с;

$\Delta T = T_{газа} - T_{воздуха}$ – разность температур, °C.

Значения коэффициентов A,F,m,n и нормативы ПДК хранятся в базе данных и автоматически подгружаются при выборе вещества и региона. Результаты расчёта Cm нормируются по ПДК с получением индекса Inorm = Cm/ПДК, который затем используется для цветовой градации на карте.

В примере значение максимальной разовой концентрации ЗВ получилось $C_m = 0.12$ мг/м³.

Тогда $I_{norm} = 0.12 / 0.05 = 2.4$ (превышение ПДК в 2.4 раза).

Цвет на карте	Интервал I_{norm}	Интервал концентрации C (мг/м³)	Степень превышения	Описание состояния
Зелёный	$I_{norm} \le 1$	$C \le 0,05$	Нет превышения	Норма (соответствует ПДК)
Жёлтый	$1 < I_{norm} \le 2$	$0,05 < C \le 0,10$	До 2 раз	Умеренное загрязнение
Оранжевый	$2 < I_{norm} \le 5$	$0,10 < C \le 0,25$	2–5 раз	Повышенное загрязнение
Красный	$5 < I_{norm} \le 10$	$0,25 < C \le 0,50$	5–10 раз	Высокое загрязнение
Тёмно-красный	$I_{norm} > 10$	$C > 0,50$	Более 10 раз	Критическое (аварийное) загрязнение

Рис. 5. Визуализация выбросов вредных веществ в ГИС-технологии

VI. Заключение

В работе предложена структура распределенной информационно-измерительной системы, которая за счет развитого алгоритмического обеспечения позволяет перейти от простой регистрации превышений предельно допустимых концентраций к комплексной вероятностной оценке экологического риска.

Разработанный подход к нормированию разнородных измерительных данных и учету неопределенности измерений создает основу для объективного контроля состояния окружающей среды и своевременного обнаружения аварийных ситуаций.

Интеграция данных в геоинформационную среду на примере Колпинского района демонстрирует

практическую применимость системы для визуализации загрязнений и поддержки решений по управлению развивающимися территориями.

Список литературы

[1] Федеральный закон от 28 апреля 2023 г. N 177-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды" и Федеральный закон "О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха»

[2] Алексеев В. В., Орлова Н.В., Брызгало В.С. Оценка риска развивающихся территорий на базе функциональных геотаксонов // 2025 XXVIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2025), 28–30 мая, 2025 г., Санкт-Петербург, Россия). СПб. 2025 г. С 243-246

[3] Алексеев В.В., Королев П.Г., Орлова Н.В., Брызгало В.С., Саранцева В.А. Информационно-измерительная система контроля состояния окружающей среды. Оценка воздействия и взаимного влияния территориальных систем на базе функциональных геотаксонов // журнал «Приборы». 2024. №9. с. 43-50.

[4] Орлова Н.В., Брызгало В.С., Саранцева В.А. Получение комплексных оценок состояния атмосферного воздуха территориальных объектов // 2025 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), 28 – 29 января, 2025 г., Санкт-Петербург, Россия). СПб. 2025 г.

[5] Экологический портал Санкт-Петербурга https://public.mon.ecopass.adc.spb.ru/air/map (дата обращения: 07.03.2025)