



УДК 681.20:547.47

В. В. Алексеев, А. А. Минина, Н. В. Орлова, В. Н. Размашкин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Построение нормированных шкал оценок при анализе экологической информации

Рассматриваются вопросы оценки состояния объектов окружающей природной среды, территориальных систем путем анализа и обработки данных результатов контрольных измерений и экспертных оценок на основе построения нормированных шкал и применения геоинформационной технологии.

Контрольные измерения, экспертные оценки, комплексная оценка, нормированная шкала, геоинформационная система

Применение информационных технологий значительно расширило возможности современных информационно-измерительных систем мониторинга (ИИСМ). Они, как правило, строятся на базе геоинформационных систем (ГИС), широко применяются методы математического моделирования развития процессов в окружающей природной среде с целью проектирования территорий, прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций, экологического управления для рационального природопользования, решаются вопросы оценки состояния объектов окружающей природной среды (ОПС), ее качества.

Последняя задача является сложной и плохо проработанной в силу следующих причин. Оценка состояния ОПС требует определения основных показателей качества для каждого элемента экологической системы в соответствии с его ролью, свойствами и целевой функцией анализа. Для каждого показателя качества необходимо определить функциональную и критериальную основу для получения его значений. Исходной информацией для формирования оценок являются результаты контроля. Это измерения физических, химических, биологических и других параметров в различных средах или оценки экспертов, которые часто носят качественный характер.

Методы получения достоверной информации и обработки исходных данных имеют свою специфику. Получение достоверных результатов контроль-

ных измерений связано с оптимизацией измерительного эксперимента и структуры информационной измерительной системы мониторинга. Получение достоверной информации на основании исследований, опросов и экспертных оценок связано с рядом проблем, с методологией проведения экспертизы и методами обработки ее результатов.

Получение сложной оценки состояния экосистемы требует объединения имеющихся результатов.

Рассмотрим возможность решения поставленной задачи на основе построения нормированных шкал для получения оценок данных разного типа.

Для обеспечения сопоставимости результатов контроля различными средствами измерений, а также результатов химического анализа, получаемых в результате выполнения аналитических процедур, необходимо выработать общий подход к анализу погрешностей. Как было показано в [1]–[5], достоверность результатов контроля описывается с помощью неопределенности.

В форме неопределенности может быть также выражена достоверность экспертных оценок и результатов опроса. Значение неопределенности будет зависеть от коэффициента доверия к каждому участнику, формируемому путем обработки определенной группы вопросов или величины, назначаемой экспертом.

Таким образом, для множества разнородных данных, используемых при формировании комплексной оценки состояния объектов ОПС, обес-

печение единой метрологической основы обрабатываемой информации может быть достигнуто путем выражения достоверности характеристик в виде неопределенности $x^* = \{x, \sigma x\}$.

Необходимо отметить, что объединение данных разных размерности и типа возможно только на основе их нормирования, т. е. на основе нормированных шкал оценок [5], [6]. Поэтому вопросам построения нормированных шкал простых и сложных оценок уделено большое внимание.

Получение данных контрольных измерений. Данные контрольных измерений получают с помощью средств измерений (СИ) их методического обеспечения. Результат измерения представляет собой числовое значение контролируемого параметра в единицах представления физической величины.

Степень достоверности (неопределенности) полученного результата [1] зависит: от погрешностей средств измерения (инструментальная составляющая, влияющие воздействия), используемого метода измерения (методическая составляющая), принятой модели процесса (погрешность неадекватности). Неопределенность результата измерений может быть определена известными способами.

Неопределенность полученной оценки характеризуется разбросом полученных результатов. При этом закон распределения вероятностей $p(x)$ в большинстве случаев имеет симметричную форму. Поэтому доверительный интервал оценки может быть определен как $x^* \pm \sigma x$.

Для характеристики природных объектов (экосистем) чаще всего используют качественную шкалу состояния. Это удобно при построении нормированных шкал оценки состояния, степени воздействия, опасности. Рассмотрим возможный вариант нормирования контрольных измерений как оценки качества объектов ОПС.

Алгоритм приведения в соответствие значений контрольных измерений к нормированным качественным оценкам показан на рис. 1: *а* – нормирующая функция; *б* – нормированная шкала.

Качественные отношения представлены в виде нормированной шкалы с равными отрезками и условными отношениями: 0–1 – (Нет); 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 высокое (ЧВ).

Значение контролируемого параметра на нормированной шкале качественных отношений может быть определено как вероятность нахождения результата контрольного измерения в соответствующем интервале концентраций. Это может быть получено путем построения нормирующей функции $Norm(x)$ и определения интервалов интегрирования для каждого значения (коридора) нормированной шкалы $x_{Norm}(i)$:

$$x_{Norm}(i) = p_i = \frac{\arg(Norm_i(x))}{\arg(Norm_{i-1}(x))} \int_{\arg(Norm_{i-1}(x))}^{\arg(Norm_i(x))} p(x) dx, \quad i = 1 \dots 7,$$

где $\arg(Norm_{i-1}(x))$ – значение аргумента (измеряемого параметра), соответствующее началу *i*-го коридора нормированной шкалы; $\arg(Norm_i(x))$ – значение аргумента, соответствующее концу *i*-го коридора нормированной шкалы.

На рис. 1 приведен пример. Предположим, что результат контрольных измерений x^* имеет характеристику неопределенности $p(x)$. Результаты интегрирования имеют значения на нормированной шкале (рис. 1, б):

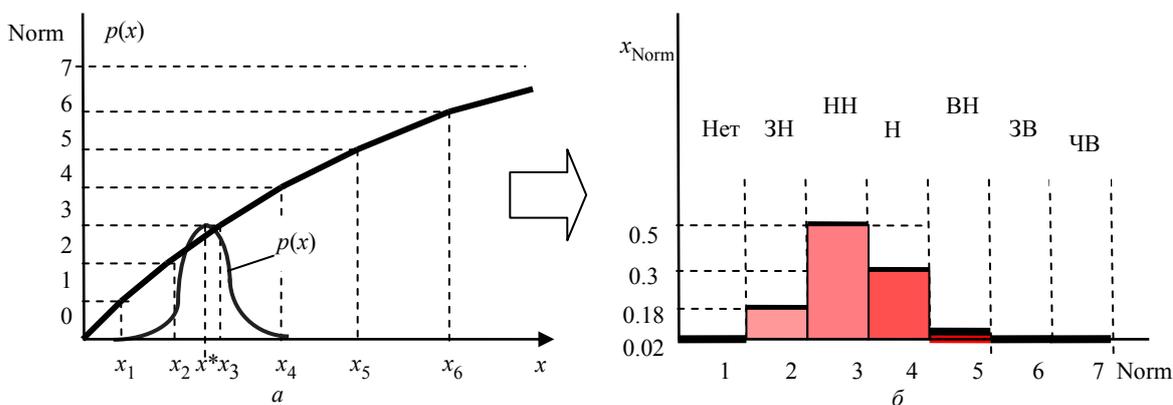


Рис. 1

$$p_1 = \int_{x_0}^{x_1} f(x^*)dx = 0.0; \quad p_2 = \int_{x_1}^{x_2} f(x^*)dx = 0.18;$$

$$p_3 = \int_{x_2}^{x_3} f(x^*)dx = 0.5; \quad p_4 = \int_{x_3}^{x_4} f(x^*)dx = 0.3;$$

$$p_5 = \int_{x_4}^{x_5} f(x^*)dx = 0.02; \quad p_6 = \int_{x_5}^{x_6} f(x^*)dx = 0.0;$$

$$p_7 = \int_{x_6}^{x_7} f(x^*)dx = 0.0.$$

Нормирующая функция $\text{Norm}(x)$ в зависимости от свойств измеряемой характеристики принимает различный вид. Так, для концентрации вредного вещества функция нормирования строится относительно предельно допустимой концентрации (ПДК). В этом случае ее удобнее представить в логарифмическом масштабе [5], так как благоприятная ситуация возможна только при малых концентрациях, т. е. до ПДК, а опасная зависит от степени превышения ПДК в некоторое количество раз. Для показателя кислотности нормирующая функция имеет двузначное определение [5] (вид параболы), так как неблагоприятной является как щелочная, так и кислотная среда. Для такой характеристики как степень подтопления нормирующая функция имеет вид гиперболы [7]. Для приведения результатов контрольных измерений химических, биологических, зоологических и других характеристик (показателей) могут быть построены нормирующие функции в различных логарифмических масштабах, с различными масштабирующими преобразованиями на разных участках изменения контролируемого параметра [5] и др.

Получение экспертных оценок. Результаты экспедиционных обследований: в виде описания участков территории в единицах загрязняющих предметов, относительных физических единицах или относительных качественных характеристиках так же, как и результаты экспертного или социологического опроса, имеют свою специфику, которая отличается присутствием в оценке достаточно большой доли субъективного фактора. Поэтому для получения такого рода информации много внимания должно быть уделено разработке методик проведения обследований, формированию вопросов для экспертов или вопросника для

социологических исследований. Получаемые оценки имеют случайный характер и могут иметь довольно большое смещение в зависимости от многих социальных причин. Степень доверия к таким данным может определяться экспертами и должна учитываться при описании целевой функции исследования.

Экспертная оценка может формироваться с помощью нескольких алгоритмов:

1. Мнение эксперта-специалиста относительно интересующей характеристики представляется в понятиях или отношениях, характеризующих ее значение:

а) «Норма» (Н) – с вероятностью $0.75 - x^* = \{Н, 0.75\}$;

б) не хуже чем «Ниже нормы» (НН) – с вероятностью $0.8 - x^* = \{НН, 0.8\}$;

в) не лучше чем «Выше нормы» (ВН) – с вероятностью $0.65 - x^* = \{ВН, 0.65\}$.

2. Оценка формируется в результате опроса специалистов по списку признаков, каждый из которых измеряется в абсолютных или относительных единицах. Для каждого признака должно быть определено отношение между значениями признака и интересующей характеристики (аналогично контрольным измерениям) $x^*(k) = \{x'(k), p(x)\} \Rightarrow (Н)$.

3. Оценка формируется в результате обследования объекта. Например, описание береговой линии. При этом регистрируются различные параметры: количество стеклянных предметов, полиэтиленовых кусков, резиновых и других предметов, масляных или нефтяных пятен, погибшей растительности и др. Значение каждого параметра определяет степень загрязненности объекта и может быть связано с нормированными значениями характеристики объекта так же, как и результаты контрольных измерений. Степень достоверности определяется как результат статистической обработки протоколов обследования каждого из участников или экспертом, как в предыдущем случае.

4. Оценка формируется в результате опроса жителей. Вопросы $\mathbf{V} = \{V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_K\}$ составлены таким образом, чтобы ответы могли быть сформулированы в понятиях нормированного пространства.

Экспертные оценки могут быть приведены к нормированной шкале. На рис. 2 приведен алгоритм получения значений оценки на нормированной шкале по результатам экспертизы.

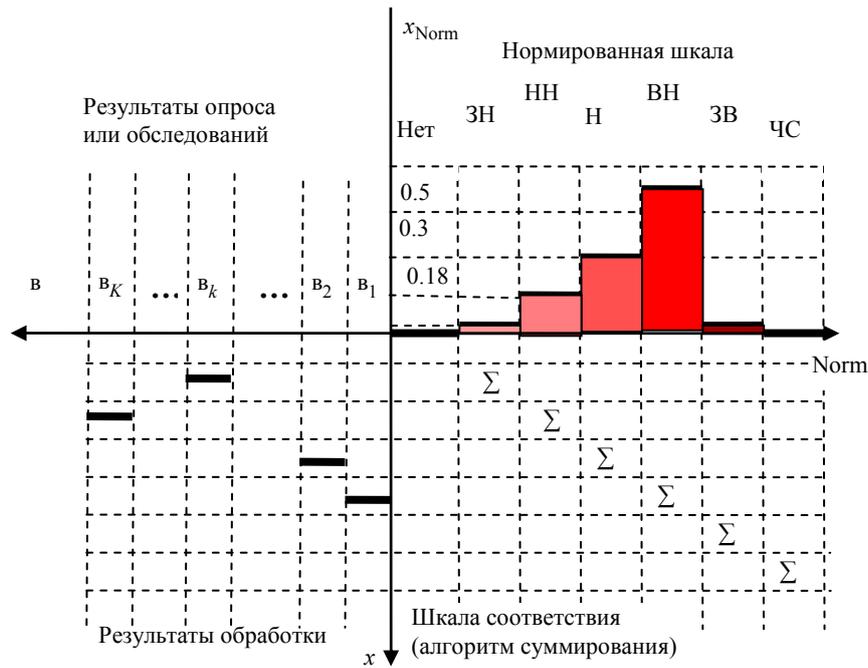


Рис. 2

Результат определяется в виде значений нормированной шкалы:

$$x_{\text{Norm}}(i) = p_i = \left(\sum_{k=1}^K x_{ik} \right) / \sum_{i=1}^7 \sum_{k=1}^K x_{ik}, \quad \sum_{i=1}^7 p_i = 1. \quad (1)$$

Получаемые оценки имеют случайный характер и могут иметь довольно большое смещение в зависимости от многих социальных причин. Степень доверия к таким данным может определяться экспертами и должна учитываться при описании целевой функции исследования.

Описанные оценки являются простыми, направленными на определение или регистрацию того или иного факта или группы фактов. Они имеют нормированную шкалу и могут быть использованы при формировании сложных оценок. Рассмотренные оценки связаны с характеристиками природных объектов экосистем разного вида: воздушный бассейн, водный объект, лесной массив и др., состояние которых определяется многими факторами и показателями и носит комплексный характер.

Получение сложной оценки. При получении оценки природных объектов часто используют результат измерений не одного показателя, а нескольких. При этом возникает необходимость объединения результатов.

Сложная оценка может производиться суммированием представленных в нормированной шкале значений параметров в соответствии с выражением

$$O_1 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \alpha_j x_j, \quad (2)$$

где J – количество суммируемых параметров; α_j – коэффициент значимости суммируемого параметра, который должен удовлетворять требованию $\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \alpha_j = 1$, или выражением

$$O_1 = \left(\sum_{j=1}^J \alpha_j \right)^{-1} \sum_{j=1}^J \alpha_j x_j. \quad (3)$$

Здесь α_j может быть любым положительным числом.

Граничные значения качественной шкалы вычисляются по (3) для соответствующих граничных значений параметров.

В процессе получения сложной оценки O_1 значения частных суммируются, при этом суммируются их случайные составляющие погрешности (неопределенность):

$$O_1 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \alpha_j (x_j \pm g\sigma_j). \quad (4)$$

Следовательно, при формировании нормированной шкалы и требований к получаемым оценкам необходимо обеспечить их сравнимость – один порядок (например, чтобы участок шкалы был $\geq 2 g\sigma_j$). Это важно при формировании значе-

Таблица 1

Параметр	Класс устойчивости				
	I	II	III	IV	V
	Максимальная (ЗВ)	Выше средней (ВН)	Средняя (Н)	Ниже средней (НН)	Минимальная (ЗН)
Взвешенные вещества, мг/дм ³	>50 (60...50)	50...20	20...10	10...3	3...0
Аммонийный азот (NH ₄ ⁺), мг/дм ³	>1 (1.2...1.0)	1.0...0.4	0.4...0.2	0.2...0.05	0.05...0.0
Бихроматная окисляемость (БО), мгО/дм ³	>50 (60...50)	50...25	25...15	15...5	5.0...0.0
Биохимическое потребление кислорода (БПК ₅), мгО ₂ /дм ³	>4 (5...4)	4...3	3...2	2...1	1...0.0

Таблица 2

Параметр	Класс устойчивости				
	I	II	III	IV	V
	Максимальная (ЗВ)	Выше средней (ВН)	Средняя (Н)	Ниже средней (НН)	Минимальная (ЗН)
Взвешенные вещества, о. е.	1.0...0.83	0.83...0.33	0.33...0.17	0.17...0.05	0.05...0.0
Аммонийный азот (NH ₄ ⁺), о. е.	1.0...0.83	0.83...0.33	0.33...0.17	0.17...0.04	0.04...0.0
БО, о. е.	1.0...0.83	0.83...0.42	0.42...0.25	0.25...0.08	0.08...0.0
БПК ₅ , о. е.	1.0...0.8	0.8...0.6	0.6...0.4	0.4...0.2	0.2...0.0
Сложная оценка (O ₁), о. е.	1.0...0.82	0.82...0.42	0.42...0.25	0.25...0.1	0.1...0.0

ний нормированной шкалы для параметров, у которых один из пределов не определен.

Рассмотрим пример из [8]. Для определения класса устойчивости водоема к изменению параметров качества воды измеряются параметры, приведенные в табл. 1.

Предъявим к ширине старшего класса формируемой шкалы требование, указанное ранее. Предполагая, что для биохимических измерений точность 10 % является наиболее вероятной, получим максимальные (нормирующие) значения для каждого контролируемого параметра. Эти значения указаны в скобках в табл. 1 для I класса устойчивости. Так как в реальных измерениях возможно превышение назначенных границ, эти значения приводятся к старшему классу шкалы.

В рассматриваемом случае получим нормированные шкалы, приведенные в табл. 2.

При расчетах O₁ используется приведенное ранее выражение для J = 4, α_j = 1.

Таким образом, полученные нормированные шкалы для сложных оценок позволяют достаточно просто по нормированным значениям параметров идентифицировать состояние объекта, определить его класс.

Очевидно, что подобные нормированные шкалы могут быть построены для любой группы

параметров. При этом могут объединяться простые и сложные оценки, входящие в определение состояния контролируемого природного объекта.

Получение комплексной оценки. Для более сложного случая состояние экосистемы может быть описано множеством целевых функций, зависящих от большого числа факторов и контролируемых параметров – данных различного типа. Например, на экосистему могут воздействовать различные факторы: химические, биологические, радиационные, энергетические, электромагнитные, механические и др. Каждый фактор описывается сложной функцией воздействия и имеет разное значение при оценке того или иного качества. При этом возникает необходимость использования простых и сложных оценок – формирования комплексной оценки.

Получение комплексной оценки связано с формированием целевых функций, объединяющих для каждого конкретного случая простые и сложные характеристики контролируемых параметров экосистемы, учитывающих степень влияния того или иного фактора.

Комплексная оценка может быть получена, если все оценки, используемые при ее формировании, представлены в нормированном виде, т. е. для каждого значения контролируемых характеристик определено: $x^* = \{x', p_x\}$ – простая оцен-

ка; $O^* = \{O', p_o\}$ – сложная оценка (где x' и O' – значение соответствующей оценки; p_x и p_o – степень неопределенности. Описанные простые и сложные оценки удовлетворяют этому требованию. Они могут служить основой для формирования комплексной оценки.

Комплексная оценка представляет собой характеристику, полученную суммированием простых и сложных оценок с учетом их свойств:

$$O = * \{x_i^*, O_i^*\},$$

$i \in I_0$

где $*$ – оператор суммирования, реализующий алгоритм вида (2) или (3), использующий процедуру (1) и учитывающий неопределенность оценок (4); x_i^* , O_i^* – простая и сложная оценки, входящие во множество важных характеристик экосистемы I_0 .

Таким образом, при выполнении указанных условий комплексная оценка состояния объектов экосистемы может быть получена, если определена функция формирования оценки. Функция формирования комплексной оценки определяется специалистом-заказчиком или экспертом-профессионалом, который вкладывает в нее свои знания и опыт. При этом определяется структура каждой оценки и правила их объединения.

На основании изложенного можно утверждать, что простые и сложные оценки могут быть представлены как некоторые вероятностные характеристики объекта в пространстве нормированных шкал. Они могут использоваться при определении состояния природного объекта, экосистемы.

Необходимо отметить, что природные объекты являются распределенными в пространстве объектами. Для их описания и детального анализа структуры и характеристик используются ГИС.

Рассмотренный подход получения простых и сложных характеристик, а также получения комплексных характеристик состояния природного объекта удобно реализуется в геоинформационной технологии.

В результате контрольных измерений и экспертных обследований формируется множество результатов, имеющих географическую и временную координаты. Эти результаты могут быть представлены в виде баз данных ГИС. Обработка данных, пространственно распределенных, изменяющихся во времени и пространстве, представляет собой сложную математическую задачу, которая эффективно может быть решена с применением ГИС-технологии [9].

Логика формирования оценки состояния природного объекта на основе ГИС показана на рис. 3.

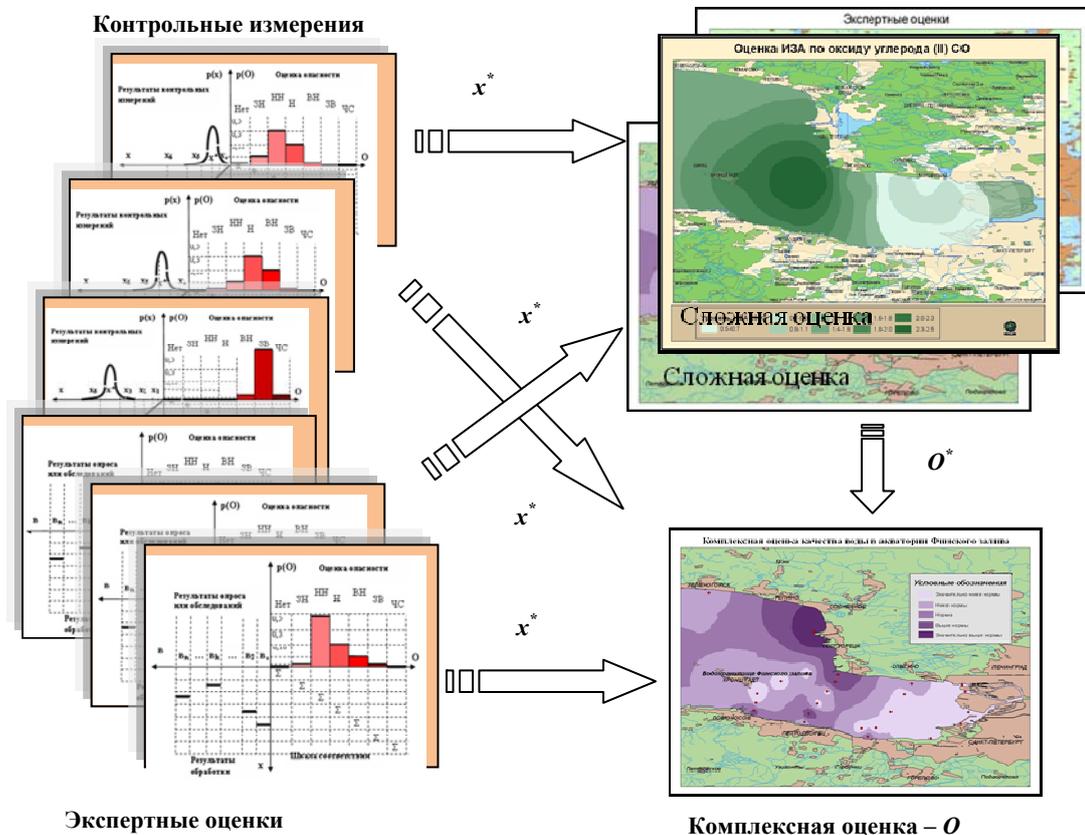


Рис. 3

Представленные на рис. 3 результаты оценивания простых характеристик (контрольные измерения химических, физических, биологических параметров, оценка состояния донных отложений, береговой зоны, результаты экспертных оценок, экспедиционных обследований, опросов населения и др.), сформированные как базы данных результатов контроля, могут быть определены как слои ГИС. Эти оценки могут быть использованы как для анализа состояния объекта самостоятельно, так и для формирования сложной или комплексной оценки.

Таким образом, рассмотрены принципы построения нормированных шкал для получения простых, сложных и комплексных оценок состояния экосистемы. Выполняя и анализируя необходимые условия получения достоверных оценок, мы не только определяем степень достоверности получаемых результатов, но и формулируем требования к проведению экологических измерений (требования к средствам измерений, методическому обеспечению измерительной процедуры, математическому аппарату обработки и представления результатов измерений).

Формируя правила объединения различных видов данных («сшивка» слоев) в соответствии со свойствами объекта и целевой функцией, специалист может получить сложную или комплексную оценку состояния объекта – слой ГИС. Эта оценка может быть отображена на карте объекта и занесена в архив (базу данных). Сформировав ряд подобных ГИС-проектов, специалист получает возможность вести оперативный анализ характеристик по результатам контроля, принимать оперативные решения при решении мероприятий рационального природопользования.

Изложенные в настоящей статье алгоритмы, а также решаемые задачи связаны с выполнением государственного проекта № 14.574.21.0043, выполняемого на кафедре ИИСТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», по теме «Проведение прикладных исследований, направленных на создание интеллектуальной информационно-измерительной системы комплексной безопасности участка обращения локомотива» (шифр заявки «2014-14-576-0048-010»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рук. ЕВРАХИМ/СИТАК. Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях. 2-е изд. / пер. с англ; ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. СПб., 2002. 149 с.
2. Оценивание неопределенности измерений при использовании программ обработки данных / А. Г. Чуновкина, В. А. Слаев, А. В. Степанов, Н. Д. Звягин // Измерительная техника. 2008. № 7. С. 3–8.
3. Слаев В. А., Чуновкина А. Г., Чурсин А. В. Неопределенность измерения: определение и способы вычисления. // Измерительная техника. 2000. № 5. С. 26–27.
4. Алексеев В. В., Комаров Б. Г., Королев П. Г. Измерительно-вычислительные системы. СПб.: ООО «Техномедиа» / Элмор, 2008. 140 с.
5. Дмитриев В. В. Оценка экологического состояния природных объектов. Что такое экологическая оценка и как построить интегральный показатель состояния природной экосистемы / Экология. Безопасность. Жизнь. Экологический опыт гражданских инициатив. Гатчина, 2001. № 2. С. 225–237.
6. Алексеев В. В., Орлова Н. В. ИИС контроля состояния природных объектов. Обеспечение единства измерений при получении оценок на основе контрольных измерений // Приборы. 2010. № 2. С. 19–28.
7. Алексеев В. В., Шишкин И. А. ИИС мониторинга состояния системы инженерной защиты территории от подтопления на базе ГИС. Ч. 2: Получение оценок, поддержка принятия управляющих решений // Приборы. 2012. № 6. С. 28–37.
8. Дмитриев В. В., Примак Е. А. Оценка устойчивости водоемов Европейского Севера к изменению параметров естественного и антропогенного режимов // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований: материалы юбилейной конф. Петрозаводск: ИВПС, 2006. С. 408–417.
9. Алексеев В. В., Орлова Н. В. ИИС мониторинга сложных объектов. Методика построения системы нормированных шкал для анализа состояния природных объектов на базе ГИС // Науч. журн. «Вестн. ТОГУ». Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2010. № 3 (18). С. 33–42.

V. V. Alekseev, A. A. Minina, N. V. Orlova, V. N. Razmashkin
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

CONSTRUCTION THE NORMALIZED RATING SCALES IN THE ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL INFORMATION

Consider questions estimation of environmental objects, territorial systems by analyzing and processing the results of measurements control and expert assessments on the basis of the construction and use of standardized scales and using geographic information technology.

Expert estimations, expert estimations, integrated estimation, normalized scale, geographic information systems