

## 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА БИОМОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

### 5.1 Метрологическое обеспечение биотестирования

В результате проведения экологической диагностики выявляются и наносятся на карту зоны экологических аномалий (ЗЭА). Обычно установление причин ЗЭА представляет труда. Например, нефтяное болото, образовавшееся в результате многолетних утечек топлива из местной котельной или несанкционированные свалки мусора. Однако в некоторых случаях выявление причин образования экологических аномалий представляет серьёзную проблему. Это, как правило, бывает в тех случаях когда:

1. Существует несколько источников загрязнения и требуется выявить приоритетный, который является причиной экологического бедствия.

**Пример.** В водопроводной воде г. Моздока появился запах нефтепродуктов. Возможных источников загрязнения было несколько: нефтепровод “Грозный - Новороссийск”; городская нефтебаза, автокомбинат и военный аэродром. Только в результате научно-исследовательской работы удалось установить, что аэродром является виновником загрязнения воды;

2. Один источник выбрасывает несколько различных по физической и химической природе ЗВ.

**Пример.** Имеется один источник загрязнения - автотрасса и различные сопутствующие ей загрязнители: выхлопные газы (диоксид углерода, монооксид углерода, оксиды азота, углеводороды, альдегиды, сажа, бенз(а)пирен); соли, применяющиеся в борьбе с обледенением; бытовой мусор и самые различные ЗВ, которые могут попадать в ОС в результате аварийных ситуаций;

3. Нет явных источников загрязнения, то есть когда, казалось бы, не может быть никаких причин для экологического бедствия, однако ЗЭА существует.

**Пример.** В Рублёвском заповеднике видовое разнообразие почвенных животных крайне низко, тогда как визуальный осмотр оставляет самое благоприятное впечатление об экологической обстановке.

Подобные случаи требуют специального экологического расследования. Для того чтобы установить причины возникновения ЗЭА прежде всего требуется информация. Источники такой информации могут быть разными.

Сбор информации проводится с целью минимизации расходов на проведение аналитических и прочих дорогостоящих исследований. В связи с этим в первую очередь собирают информацию:

- о существующих источниках загрязнения и источниках, функционировавших в прошлом, а ныне законсервированных, либо ликвидированных;
- о динамике экологической обстановки в регионе за последние годы.
- о природно-климатических условиях региона (характеристики климатических условий, почвенно-геологических и гидро-геологических);
- о наличии экологически опасных объектов.
- о заболеваемости населения (статистика детской смертности, онкологических и прочих заболеваний).

Данные запрашиваются у компетентных органов, а также путём опроса населения. С целью объективной оценки состояния экологической обстановки и здоровья населения опрос проводят путём анкетирования различными способами, в том числе по телефону. Полученный объём информации обрабатывается и наносится на карту.

**Топографическая карта** даёт целостную картину местности, отображая все её важнейшие составные элементы. К ним относятся населённые пункты, промышленные, сельскохозяйственные и социально- культурные объекты, пути сообщения, гидрография, рельеф, растительный покров, государственные и прочие политико-административные границы и другие объекты. Перечисленные выше элементы местности отображаются на всех топографических картах, но с различной подробностью, зависящей главным образом от масштаба.

Чем крупнее масштаб карты, тем больше объектов и с большими подробностями показывается на ней при изображении данной территории. С уменьшением масштаба карты сокращается информационная ёмкость изображения на ней различных объектов. Так, например, для показа разновидностей древесной и кустарниковой растительности на топографических картах масштабов 1:25000 – 1:200000 применяется около 40 различных условных обозначений, в то время как на карте масштаба 1:500000 их в 2 раза, а на карте 1:1000000 – в 4 раза меньше.

**Гидрогеологическая карта** содержит информацию о водоносных горизонтах: водовмещающие породы (коэффициент фильтрации, уровень грунтовых вод, мощность, минерализация, кислотность, жёсткость), её хозяйственное использование.

**Климатическая карта** даёт представление о природно-климатических особенностях исследуемого района (температурный режим, ветровой режим, режим осадков).

**Геоморфологическая карта** даёт описание рельефа исследуемого района: отметки поверхности земли, ландшафт, типы почв.

**Экологический паспорт** - нормативно-технический документ, включающий данные по использованию природных ресурсов и влиянию на ОС, согласованный и утверждённый в установленном порядке. Он включает данные:

- о приоритетном перечне ЗВ для данного объекта;
- о наличии очистных сооружений и их размещение на объекте;
- о нормативах ПДВ, ПДС;
- о мероприятиях, направленных на снижение загрязнения ОС;
- договора по утилизации отходов.

**Водный кадастр** - систематизированный свод документов, содержащий сведения по гидрографии водного объекта.

**Кадастр загрязнённых земель** - систематизированный свод документированных сведений, получаемых в результате проведения специалистами кадастрового учёта загрязнённых земель.

Кадастровый учёт загрязнённых земель – описание и индивидуализация загрязнённых земельных участков, в результате чего каждый из рассматриваемых участков позволяет однозначно выделить его из других и осуществить его качественную оценку, степень экологической опасности.

**Воздушные и космические снимки** – снимки, полученные в результате фотографирования местности с летательного аппарата. Аэроснимки дают полную наиболее точную и наглядную картинку расположения объектов на местности. По ним можно судить о геофизической, метеорологической, экологической обстановке и т. д. исследуемой территории.

**Проектная документация** – содержит детальную информацию о возможных источниках загрязнения: система канализации, очистные сооружения, подсобные хозяйства, склады ГСМ, банно-прачечные комплексы, химчистка и т.п.

Некоторые виды геологических карт приведены на рисунках 6.1, 6.2.

## 6.2 Методика прогнозирования зон экологических аномалий

Свидетельские показания являются весьма ценным источником информации. При их обработке больше надо рассчитывать на свой опыт и интуицию, нежели на статические методы оценки достоверности показаний.

Иногда за самым фантастическим свидетельством скрывается ценная информация. Например, очевидец посещения Земли инопланетянами в традиционной “летающей тарелке” сам того не подозревая, рассказывает о редких оптических явлениях в атмосфере или падении метеорита.

Поэтому частота появления одного и того же факта в свидетельствах различных очевидцев является серьёзным доводом для нанесения на карту и последующей его проверки, однако и единичные свидетельства, казалось бы невероятных событий, следует также рассматривать.

**Пример.** В районе военного аэродрома г. Энгельса Саратовской области были поражены яблони совхозного сада. Причиной поражения оказался авиационный керосин. Проведенные гидрогеологические исследования подтвердили наличие техногенного месторождения керосина (линзы) на поверхности грунтовых вод, образовавшегося в результате многолетних утечек из резервуаров и керосинопроводов.

Местные гидрогеологические условия исключали такого сезонного поднятия грунтовых вод, чтобы керосин достиг корневой системы деревьев. Более того, проведённые исследования убедительно доказали экологическую безопасность месторождения. Загадку помог раскрыть очевидец, сознавшийся, что видел аварийного пролива большого количества керосина на грунт. Стекая по уклону, керосин распространился вглубь сада, просочился в грунт и поразил корневую систему яблонь не снизу, а сверху! Керосин испарился, и на поверхности грунта не стало и следов об аварии.

Рисунок 6.3- Карта приведённых уровней подземных вод.

Условные обозначения:

Скважина

**ОПРОСНЫЙ ЛИСТ**  
(примерная форма, заполняется при проведении  
анкетирования населения, личного состава)

Фамилия, имя, отчество опрашиваемого  
серия № паспорта  
место регистрации  
год рождения  
образование: высшее, среднее, начальное (лишнее зачеркнуть)  
дата опроса  
место проведения опроса

№ п/п	Вопросы	Дата реги- страции эпи- зода	Место реги- страции эпизо- да	Приме- чание
1.	Не наблюдается ли в питьевой воде (колодцах, водопроводе) запах нефтепродуктов (других запахов)?			
2.	Известны ли Вам случаи массового отравления (заболевания) компактно проживающих людей?			
3.	Известны ли Вам случаи падения (отравления) скота?			
4.	Известны ли Вам факты массовой гибели (отравления) рыбы в водоёмах?			
5.	Какие источники загрязнения в Вашем регионе Вам известны?			
6.	Какие экологические опасные факторы Вас более всего беспокоят: эрозия почвы; отравление воды (в том числе питьевой); загрязнение почвы нефтепродуктами; другие факторы.			

При анализе свидетельских показаний следует учитывать, что люди, как правило, склонны преувеличивать события, свидетелями которых являлись; в свидетельских показаниях часто приводится информация, не имеющая отношения к экологической обстановке, хотя, на первый взгляд, кажется заслуживающей внимания.

**Пример.** Борцы с ракетно-космической деятельностью утверждают, что в оконных стеклах домов жителей Алтайского края появились круглые отверстия, причиной образования которых, по утверждению «специалистов», является плавиковая кислота, образовавшаяся при падении отделяющихся частей ракет-носителей. Кажется, что данная информация имеет прямое отношение к экологической обстановке, сложившейся в регионе. Однако, плавиковая кислота, даже в большой концентрации, не в состоянии мгновенно выжечь пулеобразные отверстия в стекле. До сих пор нет подтверждения существования таких отверстий и самое главное, компоненты ракетного топлива не содержат ингредиентов, которые могли бы привести к образованию плавиковой кислоты. Таким образом, данные показания никакого отношения к экологии не имеют.

Существует такое явление как целенаправленное дезинформирование общественности с различными целями, в частности, дискредитация Вооруженных Сил, нагнетание социальной обстановки для получения бюджетных средств на якобы нормализацию экологической обстановки в регионе.

### 6.3 Оценка качества биомониторинга (сравнить с другими способами)

Как было указано выше, зона аккумуляции загрязнения формируется при наличии следующих составляющих: источник или источники загрязнения; стихии, переносящие загрязнения; ландшафт и неоднородности в атмосфере и грунтах, препятствующие равномерному распределению загрязнений по площади (объему).

Анализ данных во времени позволяет объяснить некоторые причины возникновения экологических аномалий. При проведении такого анализа рекомендуется обращать внимание на возможность существования “источника-призрака”. Когда кажется, что нет никаких причин для сложившейся неблагоприятной экологической обстановки. Проанализируйте архивные материалы, посетите краеведческий музей с целью определения существования в прошлом в районе аномалии источника загрязнений (“источника-призрака”). Может оказаться, что много лет назад на этом месте существовало какое-то производство с токсичными отходами, о котором давно уже забыли.

**Пример.** Правительство одной из земель Германии обратилось к России с просьбой предоставить ей проектную документацию одного из немецких заводов по производству и снаряжению снарядов, которая была вывезена в СССР после окончания второй мировой войны.

Германские экологи обнаружили экологическую аномалию и установили, что причиной её образования являлся тот самый “завод-призрак”, который более 50 лет как не существует. Документация нужна была для того, чтобы, зная как проходили ранее системы канализации предприятия, эффективно и с наименьшими затратами провести инструментальные исследования. Пример, иллюстрирующий «источника-призраки» приведен на рисунке 6.4.

Рисунок 6.4 - Формирование зоны аккумуляции загрязнений предприятием-призраком. Сточные воды, сбегая по склону, попадают на дно впадины, там

фильтруются в грунтовые воды, загрязняя их и почву. Выбросы попадают в зону циркуляции воздуха и оседают на дне той же впадины. Через 50 лет после ликвидации предприятия на его бывшей территории построен дачный городок, все забыли о предприятии, а загрязнения остались

**Пример.** При экологическом обследовании Кунцевского района г. Москвы было обнаружено, что одно из трёх рядом стоящих деревьев без видимых причин засохло. Опрос местного населения позволил установить, что причиной гибели дерева был медный купорос, излишки которого строители слили под дерево.

Источником загрязнений и причин образования ЗЭА может являться сама природа. Реки, берущие начало в горах, у истоков имеют стремительное течение, энергия воды может разрушать не только золотоносные жилы и выносить золото в долины, где течение медленное и драгоценный металл оседает, образуя рассыпное месторождение, но точно также могут размываться и рудные тела и тогда в долинах и устьях рек будут оседать тяжёлые металлы и радиоактивные вещества, формируя экологическую аномалию.

Организмы и биоценозы чувствительны к изменению климатических условий, поэтому резкое повышение или понижение температуры, избыток или недостаток влаги могут повлиять на биоиндикаторы не в меньшей степени чем загрязнения. В этом случае природа вносит помехи в измерения и надо уметь их отфильтровать.

В результате антропогенного вмешательства морфология ландшафта постоянно меняется. Вместе с ней меняются местные циркуляции воздуха, течение рек и ручьёв в связи с чем причины образования экологических аномалий исчезают и образуются совершенно в новых местах.

После того как информация собрана и все исполнители работ с ней ознакомились, организуется процесс обсуждения возможных причин образования аномалий. Оно заключается в следующем. Участники обсуждения называют все возможные, по их мнению, причины возникновения экологических аномалий, установленных в ходе обследования.

Без какого-либо обсуждения для каждой аномалии составляется перечень возможных причин (версий) её образования. Затем каждая версия всесторонне обсуждается всем коллективом и либо отбраковывается, либо принимается для доклада.

Из рабочих версий становятся ясны причина, характер и состав загрязнений, что является основанием для подготовки предложений по проведению физико-химической диагностики с целью проверки сделанных предположений.

Отчёт (доклад) руководству и заказчику работ должен содержать карту обследованного участка местности с нанесенной на неё экологической обстановкой, краткое описание всех аномалий, а также возможные причины их образования с предложениями о дальнейших экологических исследованиях.

## **Примеры экологических расследований**

**Пример 1.** Установлено, что деревья вдоль Московской кольцевой автомобильной дороги (МКАД), что показано на рисунке 6.5, поражены: внешний вид деревьев напоминает “метлу” с облиственным главным стволом и ветками и лишенными листья боковыми побегами, на которых гибель почек достигла 100%. Это объясняется тем, что при повреждении или гибели главных почек (верхушечных и боковых) в рост пускаются пазушные и спящие почки.

Предполагаемые причины поражающих деревьев может быть несколько:

- выхлопные газы двигателей автомашин (диоксид серы, оксиды азота, тяжёлые металлы, аэрозоли и другие), которые могут поразить вегетативную систему (листья, почки) деревьев;
- применяющиеся при борьбе с обледенением соляные растворы ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ), которые могут просачиваться в почву и поражать корневую систему;
- образовавшиеся при движении машин с большой скоростью аэрозоли соляных растворов распространялись ветром на лесные участки, а после таяние снега ЗВ впитались в почву и в последующем могли поразить вегетативную систему деревьев;
- аварии на магистралях с экологическими последствиями.

Проведённый анализ и моделирование ситуации позволил сделать следующие выводы:

- четвёртая причина отпадает, поскольку аварийные ситуации носят точечный характер, а деревья поражены вдоль всей трассы;
- соляные растворы, попадающие в почвы не могут вызвать такое поражение, так как поражены деревья не только находящиеся на одном уровне с трассой, но и деревья, растущие на возвышенностях (высота 3...4 м), то есть в соответствии с капиллярным законом и механикой многофазных сред соляной раствор не может достигнуть корневой системы, находящихся на возвышениях деревьев.

Следовательно, поражение наступило либо из-за воздействия выхлопных газов, либо аэрозолей. Если сравнивать поражённый дуб, находящийся в 30 м от МКАД с дубом, находящийся в 5 м от Рублёвского шоссе, где интенсивность движение автотранспорта не уступает интенсивности движения на МКАД, то можно сделать следующий вывод. Поражение наступило в результате образования аэрозолей соляных растворов, так как поражённый дуб находится в месте, где скорость движения высокая, а дуб со здоровой кроной находится вблизи многочисленных остановок общественного транспорта. В связи с этим скорость движения транспорта здесь относительно низкая, то есть выброс выхлопных газов больше чем в районе МКАД, так как на малых скоростях происходит неполное сгорание топлива, зато при этом не образуется аэрозоль солевого раствора. Данная версия была проверена лабораторными анализами отобранных проб листья, веток и почек. Полученные данные подтвердил сделанные выводы. Строение растительных организмов приведены на рисунке 6.7.

Рисунок 6.7- Основные элементы растительного организма: 1-главный корень; 2-боковой корень; 3-корневые волоски; 4-пазушная почка; 5-черешок листа; 6-листовая пластинка; 7-узел; 8-междоузлие; 9-цветочная почка; 10-верхушечная почка; 11-чашелистик; 12-лепесток; 13-пестик; 14-тычинка; 15-цветоножка; 16-устьице; 17-ассимиляционная ткань; 18-ядро; 19-клеточная стенка; 20-хлоропласты; 21-цитоплазма

Результаты лабораторных исследований приведены на рисунке 6.8.

Рис. 6.8 - Данные аналитических исследований растительных образцов с МКАД

**Пример 2.** Вдоль Рублёвского шоссе построен жилой массив. Во время проведения экологического обследования во дворах здания были обнаружены большие экологические аномалии, хотя чисто визуально обстановка казалась экологически благоприятной.

Рисунок 6.9 - Комплекс жилых зданий вдоль Рублевского шоссе

Анализ ситуации позволил сделать следующий вывод. Данные здания стоят сплошной стеной вдоль линейного источника загрязнения (Рублёвское шоссе). Высота зданий много меньше их общей длины, т.е. данное сооружение можно рассматривать как бесконечно длинное. Господствующие ветры направлены перпендикулярно зданию в сторону от шоссе во двор. В соответствии с законами аэромеханики в этом случае во дворах здания сформировалась устойчивая зона циркуляции воздуха, т.е. застоя (аккумуляция загрязнений), размеры которой  $k_v \times L \times H$ , где  $L$  – длина здания;  $H$  – высота здания;  $k_v = 6 \div 8$  - коэффициент вихреобразования. Обстановка осложняется тем, что во дворах построены подземные гаражи. Дворы не проветриваются и загрязнения накапливаются.

## 6.5 Рейтинговые показатели качества экологической обстановки

### 6.6

На основе анализа различных факторов, которые могут существенно проявиться в состоянии ОС представляется важной оценка следующих факторов, объединенных в «родственные» группы:

- 1) воздух неопределенности (группа А1),
- 2) вода неопределенности (группа А2),
- 3) почва неопределенности (группа А3),
- 4) неопределенности ...биоты (группа А4),
- 5) иные неопределенности (группа А5).



Каждая группа факторов имеет свою значимость (вес). Сумма весов указанных групп должна составлять единицу.

Факторы каждой группы должны быть наиболее значимыми при характеристике состояния группы. Сумма их весов в группе тоже должна составлять единицу. Каждый фактор, по сути, является оценкой качества.

Для получения оценок указанных факторов можно использовать социологические, традиционные, специализированные и рейтинговые оценки, которые при необходимости можно оперативно корректировать весами, а также оценками известных и консалтинговых организаций.

Наибольшей сложностью при количественной оценке риска характеризуется корректная оценка условной вероятности, особенно от нескольких процессов и явлений. Поэтому при оценке потенциальных рисков используют индекс неопределенности выделенных факторов или групп факторов.

Индекс неопределенности выделенных факторов представляет собой комплексный показатель, равный отношению значения средних взвешенных оценок выделенных факторов относительно аналогичных оценок базовых факторов.

Обобщенная средневзвешенная арифметическая оценка выделенных факторов, например,  $j$ -й группы оценивается с помощью следующего выражения:

$$K_{j \text{ группы}} = \sum_{i=1}^N a_{i,j} K_{i,j}, \quad j = \text{const},$$

где  $a_{i,j}$  – долевые коэффициенты весомости выбранных  $N$  факторов в  $j$ -й группе (если  $a_i$  выражены в долях, то их сумма равна 1),

$K_{i,j}$  – оценки факторов, которые могут быть единичными, комплексными, удельными и т.д., а также обобщением нескольких внутренних подфакторов,

$N$  – количество выбранных для учета факторов в группе.

Аналогично оценивается средневзвешенный арифметический индекс выделенных групп факторов, что в целом приводит к итоговому средневзвешенному арифметическому индексу факторов неопределенности:

$$K_{\Sigma} = \sum_{j=1}^L b_j \sum_{i=1}^N a_{i,j} K_{i,j},$$

где  $b_j$  – долевые коэффициенты весомости выбранных групп факторов (если  $b_j$  выражены в долях, то их сумма равна 1),

$L$  – количество выбранных для учета групп, наиболее полно характеризующих анализируемый процесс.

При использовании балльных шкал несложно перейти в долевые оценки.

Преимуществом представленного подхода является возможность объединения достаточно разнородных характеристик, возможность использования произвольного количества групп и факторов.

При комплексной оценке уровня неопределенности возможно использование средневзвешенной геометрической оценки неопределенности:

$$K^* = \sqrt[N \cdot L]{\prod_{\substack{i=1, \dots, N \\ j=1, \dots, L}} K_{i,j}^{a_{i,j} b_j}}.$$

Возможно использование комбинаций средневзвешенного геометрического средневзвешенного арифметических оценок неопределенности анализируемых факторов. Например:

$$K_{\Sigma}^* = \sum_{j=1}^L b_j \sqrt[N]{\prod_{i=1, \dots, N} K_{i,j}^{a_{i,j}}},$$

К оцениванию индекса неопределенности выделенных факторов можно перейти с помощью базовых оценок:

$$I = K_{\Sigma} / K_{\Sigma}^{баз} = K^* / K^{*баз}.$$

На основе этого индекса можно оценивать инвестиционную привлекательность анализируемых объектов, а при накоплении достаточных рядов наблюдений и другие характеристики.

Возможна ситуация, когда эксперт (инвестор) имеет свое собственное мнение в отношении набора анализируемых групп или факторов в них, или в отношении доверия к полученным значениям индекса  $I$  для ряда инвестиционных проектов. Собственное мнение может быть обусловлено квалификацией эксперта или неопределенностью оцениваемого объекта (анализируемых факторов). При этом необходима теоретическая база для обоснованного выбора и принятия решений.

Для согласования исходных характеристик при единоличном принятии решений в условиях реального масштаба времени и в аналитическом планировании часто используется метод анализа иерархий (МАИ), разработанный американским профессором Томасом Саати (Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993).

Первым этапом применения МАИ является структурирование проблемы выбора в виде иерархии или сети. Иерархия может строиться через промежуточные уровни, на которых оцениваются приоритеты (вес) факторов, затем групп факторов, затем перспектив анализируемых проектов.

В МАИ элементы задачи сравниваются попарно по отношению к их воздействию на общую для них характеристику.

Система парных сведений приводит к результату, который может быть представлен в виде обратно симметричной матрицы. Элементом матрицы  $\{a_{ij}\}$  является интенсивность проявления элемента иерархии  $i$  относительно элемента иерархии  $j$ , оцениваемая по шкале относительной важности:

Шкала относительной важности

Значение относительной важности	Определение	Объяснение
0	Несравнимы	Эксперт затрудняется в сравнении
1	Равная важность	Равный вклад двух видов деятельности в цель
3	Умеренное превосходство одного над другим	Опыт и суждения дают легкое превосходство одному виду деятельности над другим
5	Существенное или сильное превосходство	Опыт и суждения дают сильное превосходство одному виду деятельности над дру-

		гим
7	Значительное превосходство	Одному из видов деятельности дается настолько сильное превосходство, что оно становится практически значительным
9	Очень сильное превосходство	Очевидность превосходства одного вида деятельности над другим подтверждается наиболее сильно
2,4,6,8	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями	Применяются в компромиссном случае
Обратные величины приведенных выше чисел	Если при сравнении одного вида деятельности с другим получено одно из вышеуказанных чисел (например, 3), то при сравнении второго вида деятельности с первым получим обратную величину (т.е. 1/3)	

Эта шкала была разработана Т. Саати для проведения субъективных парных сравнений и оказалась лучше 28 других шкал, предложенных разными лицами. От этого выиграл метод парных сравнений, который, как и указанная шкала, оказался лучше приспособлен к особенностям обработки информации человеком.

Для справки. Выбор шкалы определялся следующими требованиями:

- 1) шкала должна давать возможность улавливать разницу в чувствах людей, когда они проводят сравнения, различать как можно больше оттенков чувств;
- 2) эксперт должен быть уверенным во всех градациях своих суждений одновременно.

На основе указанной шкалы производится сравнение одного фактора  $i$  с другим  $j$  и назначается оценка  $a_{ij}$ . Соответственно,  $a_{ji}=1/a_{ij}$  (наличие отклонений от этой величины может свидетельствовать о разногласиях в позиции эксперта, но нам необходимо получить обратно симметричную матрицу, поэтому  $a_{ji}=1/a_{ij}$ ).

Опыт показал, что при проведении попарных сравнений элементов  $A_i$  и  $A_j$  в основном ставятся следующие вопросы:

какой из них важнее или имеет большее воздействие ?

Какой из них более вероятен ?

Какой из них предпочтительнее ?

Относительная сила, величина или вероятность каждого отдельного объекта в иерархии определяется оценкой соответствующего ему элемента собственного вектора матрицы приоритетов, нормализованного к единице. Процедура определения собственных векторов матриц поддается приближению с помощью вычисления геометрической средней.

Пусть для  $A_1...A_n$  – множества из  $N$  элементов определены  $a_{ij}$ :

	$A_1$	Столбец по $j \rightarrow$	$A_N$
$A_1$	1	...	$a_{1N}$
Строка по $i \downarrow$	...	1 ( $i=j$ )	
$A_N$	$a_{N1}$	...	1

Оценка компонент вектора приоритетов производится по схеме:

	$A_1$		$A_N$		
$A_1$	1	...	$a_{1N}$	$x_1 = \sqrt[N]{\prod_j a_{1j}}$	$\text{Вес}(A_1) = x_1 / \sum_{i=1, \dots, N} (x_i)$
	...	1			...
$A_N$	$a_{N1}$	...	1	$x_N = \sqrt[N]{\prod_j a_{Nj}}$	$\text{Вес}(A_N) = x_N / \sum_{i=1, \dots, N} (x_i)$
				$\sum_{i=1, \dots, N} (x_i)$	

Полезным побочным продуктом МАИ является так называемый индекс согласованности (*IS*) оценок  $a_{ij}$ :

$$IS = (\lambda_{\max} - N) / (N - 1),$$

где  $\lambda_{\max}$  – наибольшее собственное значение анализируемой обратно симметричной матрицы, которое можно оценить по формуле:

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1, \dots, N} \text{Вес}(A_j) \sum_{i=1, \dots, N} a_{ij}.$$

Показатель *IS* характеризует согласованность множества субъективных оценок, полученных способом парного сравнения и представленных в виде отношения предпочтения сравниваемых свойств.

Значения  $IS_{\text{сл}}$  при случайном выборе количественных суждений из указанной шкалы и образовании обратно симметричной матрицы приведены в следующей таблице.

Размер матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайная согласованность	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Значение  $IS/IS_{\text{сл}}$  матриц одного порядка характеризует отношение согласованности (ОС). Величина ОС должна быть порядка 10% или менее, чтобы быть приемлемой. В некоторых случаях допускается ОС до 20%, но не более, иначе надо проверить свои суждения, так как исходная информация недопустимо искажена экспертом (противоречивость информации выше нормы). В этом случае принятые решения будут характеризоваться большой неточностью и очень низким качеством. Следовательно, требуется пересмотр исходной информации или привлечение дополнительных источников ее получения.

Следует заметить, что область применения МАИ ограничена требуемым уровнем согласованности исходной экспертной информации, а задачи выбора могут быть решены методами анализа иерархий только при полном объеме исходной информации и допустимом уровне согласованности экспертных оценок.

С целью снижения уровня несогласованности информации в МАИ используется способ коррекции исходных данных, который относится к единоличным способам пересмотра и согласования оценок самим экспертом и предполагает заранее неизвестное число циклов пересмотра и изменения значений экспертных оценок с повторной проверкой на согласованность, до тех пор, пока не будет достигнут допустимый уровень согласованности оценок.

Такой поиск в большей мере случаен, так как не задан механизм уменьшения несогласованности экспертных оценок (отсутствует критерий изменения оценок). Кроме того, этот поиск крайне трудоемок и требует многократного обращения к эксперту с целью пересмотра исходных и вновь полученных данных на предмет их согласованности. Помимо всего прочего, он не может быть использован в автоматических системах для коррекции субъективно полученной информации при принятии решений.

Для расширения области применения методов анализа иерархий возникает необходимость в разработке способов автоматического согласования экспертных данных при недопустимом уровне несогласованности.

Пример. Планируется провести экологическую разведку 2-4 территорий. Как расставить приоритеты при выборе очередности анализируемых территорий?

Допустим, что в результате отбора по индексу  $I$  выбраны 4 территории:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ . Лицо принимающее решение (ЛПР) о выборе первоочередной территории для проведения экологической разведки пытается определить приоритет проектов ( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ). При этом у него есть некоторые сомнения в репрезентативности методики оценивания значения индекса  $I$ , которая, действительно, весьма условна. К тому же ЛПР имеет собственные взгляды на приоритетность указанных проектов и использует неучтенные в методике источники информации.

Это приводит ЛПР к следующей расстановке приоритетов:

Обратно-симметричная матрица результатов попарного сравнения приоритетности обследования территорий

	Проект $A_1$	Проект $A_2$	Проект $A_3$	Проект $A_4$
Проект $A_1$	$1 = a_{11} = (a_1/a_1)$	$5 = a_{12} = (a_1/a_2)$	$6 = a_{13} = (a_1/a_3)$	$7 = a_{14} = (a_1/a_4)$
Проект $A_2$	$1/5 = a_{21} = (a_2/a_1)$	$1 = a_{22} = (a_2/a_2)$	$4 = a_{23} = (a_2/a_3)$	$6 = a_{24} = (a_2/a_4)$
Проект $A_3$	$1/6 = a_{31} = (a_3/a_1)$	$1/4 = a_{32} = (a_3/a_2)$	$1 = a_{33} = (a_3/a_3)$	$4 = a_{34} = (a_3/a_4)$
Проект $A_4$	$1/7 = a_{41} = (a_4/a_1)$	$1/6 = a_{42} = (a_4/a_2)$	$1/4 = a_{43} = (a_4/a_3)$	$1 = a_{44} = (a_4/a_4)$

Из этой матрицы следует, что ЛПР отдает явный приоритет территории  $A_1$  (при количественной оценке степени согласия нескольких экспертов традиционно используется коэффициент конкордации).

В соответствии с рассмотренным выше алгоритмом необходимо найти максимальное собственное значение  $\lambda_{\max}$  матрицы  $\{a_{ij}\}$

Для справки. Максимальное собственное значение  $\lambda_{\max}$  матрицы  $\{a_{ij}\}$  является решением характеристического уравнения:

$$\det \begin{pmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 1/a_{12} & a_{22} - \lambda & a_{23} & a_{24} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & a_{33} - \lambda & a_{34} \\ 1/a_{14} & 1/a_{24} & 1/a_{34} & a_{44} - \lambda \end{pmatrix} = 0.$$

Это уравнение четвертого порядка. Сложность и громоздкость его получения обуславливает использование приближенных методов собственных значений  $\lambda$ , один из которых, собственно, и был приведен в методике.

В идеальном варианте (когда ЛПР «знает абсолютную истину будущего», в соответствие с чем и расставил приоритеты) вектор:

$$\bar{a} = \begin{pmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \\ a4 \end{pmatrix}$$

является собственным вектором матрицы  $\{a_{ij}\}$  с собственным значением  $n=4$ , то есть:

$$\{a_{ij}\} \bar{a} = n \bar{a} \text{ или нагляднее: } \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 1/a_{12} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & a_{33} & a_{34} \\ 1/a_{14} & 1/a_{24} & 1/a_{34} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \\ a4 \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \\ a4 \end{pmatrix}.$$

Но дело в том, что ЛПР-человек, который всегда субъективен и, «не зная будущего», делает ошибки. Поэтому:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 1/a_{12} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & a_{33} & a_{34} \\ 1/a_{14} & 1/a_{24} & 1/a_{34} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \\ a4 \end{pmatrix} = \lambda_{\max} \begin{pmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \\ a4 \end{pmatrix}, \text{ при } \sum_{i=1}^4 a_i = 1.$$

Рассматривая матрица  $\{a_{ij}\}$  является положительной (все ее элементы строго больше нуля).

Согласно теореме Перрона-Фробениуса ее наибольшее собственное значение  $\lambda_{\max}$  положительно, а соответствующий этому наибольшему собственному значению собственный вектор  $\bar{a}$  имеет положительные координаты:  $a_i > 0$ .

Введенное условие  $\sum_{i=1}^4 a_i = 1$  выделяет единственный собственный вектор с положительными координатами, причем:

$$\min_{1 \leq i \leq 4} \sum_{j=1, \dots, 4} a_{ij} \leq \lambda_{\max} \leq \max_{1 \leq i \leq 4} \sum_{j=1, \dots, 4} a_{ij}.$$

Конец справки.

Рассчитанные в соответствии с приведенной методикой веса анализируемой обратно-симметричной матрицы результатов попарного сравнения перспективности проектов представлены следующим вектором:

$$\text{Веса} = \begin{pmatrix} 0,614 \\ 0,239 \\ 0,103 \\ 0,045 \end{pmatrix}.$$

а оценка

$$\lambda_{\max}1 = 4,422.$$

При другом подходе к оцениванию  $\lambda_{\max}$ :

$$\{a_{ij}\} \times \{\text{Вес}_i\} = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 6 & 7 \\ 1/5 & 1 & 4 & 6 \\ 1/6 & 1/4 & 1 & 4 \\ 1/7 & 1/6 & 1/4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,614 \\ 0,239 \\ 0,103 \\ 0,045 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,738 \\ 1,041 \\ 0,444 \\ 0,198 \end{pmatrix}.$$

Из чисел:  $2,738:0,614=4,462$ ,  $1,041:0,239=4,367$ ,  $0,444:0,103=4,311$ ,  $0,198:0,045=4,421$  в качестве приближенного собственного значения используем среднее:

$$\lambda_{\max}2 = (4,462 + 4,367 + 4,311 + 4,421) : 4 = \sim 4,390.$$

С учетом оценки  $\lambda_{\max}1$  индекс согласованности  $OC1=0,156$ . Для  $\lambda_{\max}2$   $OC2=0,145$ .

Напомним, что величина ОС должна быть порядка 10% или менее, чтобы быть приемлемой. В некоторых случаях допускается ОС до 20%, но не более, иначе ЛПР надо проверить свои суждения (противоречивость информации выше нормы). В этом случае принятые решения будут характеризоваться большой неточностью и очень низким качеством.

Приведенный пример показал возможность оценивания приоритетов при попарном сравнении важности обследования выбранных территорий.

Полученные расчетные значения показали явную предвзятость ЛПР к оцениванию приоритетности отобранных для обследования территорий с близкими значениями по характеристикам индекса I. При этом необходим пересмотр исходной информации, привлечение дополнительных источников ее получения, анализ мотивов ЛПР, отдавшего явное предпочтение территории А1.