

## МОНИТОРИНГ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЭКОСИСТЕМ (ПОНЯТИЙНО-ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ АППАРАТ)

Ю. М. Зинюков

*Воронежский государственный университет*

Оптимизация мониторинга природно-технических экосистем (ПТЭС) связывается с разработкой и внедрением методик конструирования моделей исследуемых систем как сложных природно-техногенных объектов. При разработке новых методик моделирования природно-техногенных взаимодействий и организации их мониторинга мы нередко вынуждены оперировать новыми терминами и понятиями, являющихся логическим следствием новых подходов и нового видения решения данной проблемы. В статье представлен новый специализированный понятийно-терминологический аппарат, рекомендуемый к использованию в мониторинге природно-технических экосистем.

При разработке новых методик моделирования природно-техногенных взаимодействий и организации их мониторинга мы нередко вынуждены оперировать новыми терминами и понятиями, являющихся логическим следствием новых подходов и нового видения проблемы оптимизации мониторинга природно-технических экосистем (ПТЭС). Новые термины и понятия были использованы в контексте описания оригинальной методологии организации и ведения мониторинга ПТЭС [1-3]. При этом вопросы терминологии являются самостоятельным методологическим блоком, понятийно-смысловым основанием представленной методологии. В связи с этим целесообразно рассматривать понятийную базу в качестве целостного предмета.

В данной статье представлен специализированный понятийно-терминологический аппарат, рекомендуемый к использованию в мониторинге природно-технических экосистем. Понятийно-терминологический аппарат представлен в форме терминологического словаря-справочника.

### ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ-СПРАВОЧНИК

1. *Природно-техническая (техногенная) экосистема* (ПТЭС) — принципиально новый тип сложных систем (в содержательном смысле), представляющий собой совокупность природных и техногенных объектов, объединение которых связывается с достижением двух взаимно противоположных целей: основной технической цели — выпуском продукции (или иной техни-

ческой задачи), и основной экологической цели — минимизации негативного воздействия техногенного объекта на природную среду (в первую очередь, на защищаемые объекты природной среды — подземные воды питьевого назначения, реки, водохранилища и др.).

Данная система абстрактно моделируется исследователем в соответствии с поставленными целями, на основании *критериев вовлечения* объектов в систему в качестве ее элементов и *критериев иерархической организации* ПТЭС. Эмерджентным свойством ПТЭС является ее способность обеспечивать экологическую безопасность природной (геологической) среды при функционирующем техногенном объекте.

2. *Критерии вовлечения природных объектов в ПТЭС* — критерии, на основании которых природные (геологические) объекты вовлекаются в природно-техническую экосистему при ее конструировании. Основным показателем является подверженность природных объектов негативному влиянию техногенного объекта и их принадлежность к защищаемым объектам. Выделяется прямая и косвенная подверженность негативному влиянию техногенного объекта.

Предлагаются следующие критерии:

— *подверженность* горных пород, подземных и поверхностных вод *прямоу техногенному воздействию* со стороны элементов технической подсистемы (данные объекты подвергаются первоочередному влиянию — механическому, химическому, физическому и др. и, как правило, пространственно находятся в пределах контура расположения техногенного объекта);

— *подверженность* природных объектов негативному воздействию со стороны *смежных*

**элементов природной подсистемы**, испытывающих прямое техногенное воздействие (влияние загрязненных вод одного горизонта на воды других горизонтов, влияние загрязненного участка на смежный с ним незагрязненный участок в пределах одного горизонта и др.);

— **принадлежность** природных объектов (или их частей) к собственно **защищаемым объектам** (к защищаемым объектам относятся те участки, изменение которых свыше установленных пределов делает ситуацию чрезвычайной в экологическом отношении — это реки, водохранилища, участки подземных вод питьевых водозаборов, населенные пункты с частным водоснабжением и др.);

— **принадлежность** природных объектов или их частей к участкам, **смежным** с защищаемыми объектами, так как в силу их загрязненности наступает прямая угроза последним, и такие участки играют роль контрольных, сигнальных участков в защите природных объектов;

— **принадлежность** природных объектов или их частей к участкам, промежуточным в направлении от техногенного объекта к защищаемым объектам, выделяемых в целях дополнительной безопасности.

**3. Структурная организация (структура) ПТЭС** — отношения и связи элементов в системе, определяемые подверженностью природной (геологической) среды негативному влиянию техногенного объекта в направлении от участков прямого техногенного воздействия до защищаемых участков природной среды (по вектору наблюдения).

Вектор наблюдения определяет структуру ПТЭС и имеет вид — «**источник негативного влияния** → **защищаемый объект**». В пределах данного вектора следует выделять **участки, подверженные прямому техногенному воздействию** (расположены, как правило, в активной зоне — грунтовые основания, воды первых от поверхности водоносных горизонтов и др.); **участки, смежные с ними**, в силу чего, являющиеся потенциально подверженными негативному влиянию со стороны измененных природных объектов; **защищаемые участки** природной среды — значимые водотоки, участки питьевых водозаборов, участки водоносных горизонтов, используемые для частного водоснабжения и др.; **участки, смежные с защищаемыми участками**, так как в силу их загрязненности наступает прямая угроза защищаемым участкам. Для дополнительной

безопасности можно выделять и переходные участки. В итоге, вектор наблюдения обретает вид «**техногенный объект** → **участок природной среды прямого техногенного влияния** → **участок природной среды, смежный с ним** → **переходный участок** → **участок природной среды, смежный с защищаемым участком** → **защищаемый участок природной среды**».

Таким образом, элементы природной среды, вовлеченные в природно-техническую экосистему по предложенным критериям можно формализовать в пределах вектора наблюдения в виде выделенных участков, которые условно можно именовать участками «Т», «ST», «Р», «SZ» и «Z» (литеры указывают на функциональную принадлежность участка). Данные участки можно рассматривать как главные структурные элементы геологической среды ПТЭС в соответствии с определенным им рангом.

**4. Защищаемые объекты природной (геологической) среды** — участки природной среды, изменение которых свыше установленных пределов делает ситуацию чрезвычайной в экологическом отношении. Это реки, водохранилища, участки подземных вод питьевых водозаборов, участки подземных вод территорий населенных пунктов с частным водоснабжением (колодцы, родники) и др.

Наличие и местоположение защищаемых объектов является определяющим моментом при установлении пространственных границ исследуемой ПТЭС. При этом следует отметить, что защитить все объекты природной среды не представляется возможным, особенно объекты, расположенные в пределах прямого техногенного влияния, и если их изменения не представляют экологической опасности для защищаемых объектов, то система сохраняет свою устойчивость.

**5. Критерии иерархической организации ПТЭС** — принципы организации иерархической структуры, на основании которых производится декомпозиция системы от элементов самого высокого уровня (подсистема 1-го ранга) до элементов предельного уровня.

Предлагается выделять семь уровней иерархической организации ПТЭС по следующим признакам:

1-й уровень организации. Выделяющий признак генетический — «происхождение объекта». Объекты подразделены на природные и технические (техногенные) объекты.

Следующие три уровня выделены по принципу: тип, род, вид.

2-й уровень организации. Выделяющий признак — «тип объекта». Объекты природной подсистемы подразделены — на геологические тела, водные объекты, атмосферные осадки, биотические компоненты.

3-й уровень организации. Выделяющий признак — «общее наименование объекта» (род объекта). Так, геологические тела подразделены на горные породы, почвы, донные отложения; водные объекты подразделены на подземные воды, поверхностные водотоки и водоемы и др.

4-й уровень организации. Выделяющий признак — «наименование объекта» (вид объекта). Горные породы представлены условно обозначенными отложениями № 1 (например, аллювиальные отложения современного возраста), отложениями № 2 (например, отложения верхнечетвертичного возраста) и др.; подземные воды представлены условно обозначенными водами водоносного горизонта № 1 (например, воды современного горизонта), водами водоносного горизонта № 2 (воды верхнечетвертичного горизонта) и др.

Данные уровни выделены в соответствии с традиционно принятыми в геологии, а для технической подсистемы — в промышленности, правилами наименования объектов. Следующий уровень выделения природных элементов является оригинальным и определен в соответствии с универсально-формализованным подходом к элементам ПТЭС по вектору наблюдения.

5-й уровень организации. Выделяющий признак — «индивидуальное наименование целостного объекта». На данном уровне завершается рассмотрение объекта как целостного образования (для техногенной подсистемы — по техническому проекту, для природной — по предложенным принципам). Так, подземные воды подразделены на *воды какого-либо участка* условного водоносного горизонта № 1 (участки «Т», «ST», «Р», «SZ», «Z»), на *воды какого-либо участка* условного водоносного горизонта № 2 и т.д.

6-й уровень организации. Выделяющий признак — «именованный участок целостного объекта» (представлен в системе понятием «пункт наблюдения»). Например, «пункт наблюдения № 1» — это воды в пределах какого-либо участка водоносного горизонта). Пункты наблюдения соответствуют дробному подразделе-

нию участков «Т», «ST», «Р», «SZ», «Z» и могут соответственно именоваться участками «Т<sub>1</sub>», «Т<sub>2</sub>», «Т<sub>3</sub>» и т.д.

7-й уровень организации. Выделяющий признак — «предельный объем изучения целостного объекта». Представлен в системе понятием «проба воды», «образец грунта», «замер», «осадочная марка» и др. Это элементарный уровень организации, который при решении задач мониторинга ПТЭС обладает свойством формализуемости.

Предельность объема изучения устанавливается исследователем. Для различных ПТЭС и целей их исследования число уровней организации может меняться. Предложенные критерии позволяют видеть всю организацию системы, отвечающую уровню исследовательских задач. В ранжировании данной модели все уровни оказались самозначимыми, удобными для самостоятельного анализа и последующей организации базы данных мониторинга ПТЭС.

**6. Системно-структурная функция наблюдательной сети мониторинга ПТЭС** — функция сети наблюдений за состоянием природной геологической среды, позволяющая определять окончательную структуру ПТЭС и отвечающая предельному уровню ее организации (наблюдательные пункты, пробы воды (грунта) и др.).

Таким образом, режимная сеть наблюдений выступает не только в качестве технического и методического средства получения информации, но и является *формой представления структуры изучаемого объекта* при оценке его состояния. Открытие *системной функции* наблюдательной сети играет *принципиально новую и важнейшую методологическую роль* в системном анализе сложных природно-техногенных объектов и, в конечном счете, в проведении мониторинга природно-технических экосистем. В связи с этим, уже на начальной стадии изучения ПТЭС наряду с раскрытием ее структуры важнейшей операцией является оптимальная организация наблюдательной сети, несущей на себе уже и *системную* нагрузку, так как наблюдательная сеть оказывается тождественной элементарному уровню организации системы.

**7. Экспертная модель устойчивости ПТЭС** — модель нормального (равновесного) функционирования исследуемых систем, условный эталон для сравнения и оценки степени выхода системы из состояния гомеостаза.

Экспертная модель опирается на оценку не всех природных объектов, потерявших устойчи-

вость по ГОСТу (или другим нормативным документам), а только тех, которые выбраны экспертом исследуемой ПТЭС в качестве *защищаемых объектов*. Таковыми объектами могут являться отдельные участки рек (или вся река в целом), ручьев, водохранилищ, подземные воды участков питьевых водозаборов, отдельные инженерные сооружения и т.д. А в качестве гомеостатических параметров выступать и нормируемые ГОСТом показатели на самих защищаемых участках и показатели состояния смежных участков, не являющихся защищаемыми, которые, достигнув определенных значений, угрожают в ближайшем будущем выходу из равновесия (загрязнению, подтоплению, деформациям) собственно защищаемых объектов. Другими словами, *экспертная модель устойчивости* системы подразумевает наличие *двухярусной границы гомеостаза*: граничных параметров для защищаемых объектов и граничных параметров для участков, смежных с ними.

Принципы первоочередного выделения защищаемых объектов и двухярусности границ гомеостаза рекомендуются как обязательные при определении модели устойчивости ПТЭС, которая, в свою очередь, вносит коррективы в методику организации и ведения мониторинга ПТЭС.

8. *Двухярусность границ гомеостаза ПТЭС* — принцип оценки устойчивости исследуемой системы как по граничным (гомеостатическим) параметрам состояния защищаемых объектов, так и по граничным параметрам состояния участков, смежных с ними. Такой подход позволяет своевременно предотвратить выход системы из устойчивого (равновесного) состояния, оцениваемый, в конечном счете, по состоянию защищаемых объектов.

9. *Вектор мониторинга* — основное направление контроля и прогноза изменения состояния геологической среды в направлении от техногенного объекта (источника негативного воздействия) к защищаемым элементам ПТЭС.

«Вектор наблюдения» является обязательным структурным элементом мониторинга ПТЭС и относится к разряду его основных элементов. «Вектор мониторинга», который в связи с этим можно именовать *«структурной осью ПТЭС»*, в свою очередь, состоит из последовательно представленных основных элементов природной подсистемы ПТЭС — участков или,

при картографическом представлении, — *ярусов* «Т», «СТ», «Р», «SZ», «Z». Весьма существенным моментом в предлагаемой методике моделировании ПТЭС является то, что новые понятия и структурные элементы формализуемы! В силу чего, они могут являться универсальными фигурами при определении структуры любой ПТЭС и структуры ее мониторинга. Вектор мониторинга может иметь пространственную ориентацию (по горизонтали и по вертикали).

10. *Ярусы вектора мониторинга* — структурные элементы вектора мониторинга, имеющие свое функциональное назначение и находящиеся в определенной связи и отношении друг с другом. Яруса вектора мониторинга представляют собой участки природной (геологической) среды в пределах вектора наблюдения.

Выделяют *ярусы, подверженные прямому техногенному воздействию* (расположены, как правило, в активной зоне (грунтовые основания, воды первых от поверхности водоносных горизонтов и др.)); *участки, смежные с ними*, в силу чего, являющиеся потенциально подверженными негативному влиянию со стороны измененных природных объектов; *защищаемые участки природной среды* — значимые водотоки, участки питьевых водозаборов, участки водоносных горизонтов, используемые для частного водоснабжения и др.; *участки, смежные с защищаемыми участками*, так как в силу их загрязненности наступает прямая угроза последним, и такие участки выполняют роль контрольных, сигнальных участков в защите природных объектов. Для дополнительной безопасности выделяются переходные участки. Ярусы связаны между собой направленностью *«техногенный объект → участок природной среды прямого техногенного влияния → участок природной среды, смежный с ним → переходный участок → участок природной среды, смежный с защищаемым участком → защищаемый участок природной среды»*.

Ярусы условно именуется символами «Т», «СТ», «Р», «SZ» и «Z» (литеры указывают на функциональную принадлежность участка). Данные участки можно рассматривать как главные структурные элементы мониторинга геологической среды ПТЭС в соответствии с определенным им рангом.

11. *Структура мониторинга ПТЭС* — организация мониторинга ПТЭС как совокупности «векторов мониторинга», определяющих направление контроля, прогноза и управления

состоянием элементов системы, с характеристикой их параметров, представленных в паспорте вектора мониторинга.

Структура мониторинга, по своей сути, сводится к структуре ПТЭС, которая собственно и моделируется исключительно под углом зрения ее мониторинга. Система мониторинга ПТЭС (направленность контроля) автоматически определяется как только будет сконструирована структурно-иерархическая модель системы, являясь ее зеркальным отображением. Модель ПТЭС порождает систему мониторинга, а мониторинг ПТЭС почти полностью определяется моделью ПТЭС. В данном случае можно говорить о своеобразной тождественности двух понятий. При этом определяющая роль отводится начальной стадии мониторинга — этапу его организации, на котором собственно и конструируется модель исследуемой ПТЭС.

В самом простом варианте модель структуры мониторинга ПТЭС можно представить следующим образом: ПТЭС состоит из совокупности векторов мониторинга; вектор мониторинга, в свою очередь, состоит из ярусов; векторные яруса состоят из участков яруса (одного или нескольких), представленных пунктами наблюдения, состояние которых во времени характеризуется состоянием отобранных в них проб (предельных элементов системы).

12. **Паспорт вектора мониторинга** — методический документ, характеризующий параметры вектора мониторинга ПТЭС.

Форма паспорта вектора мониторинга  
**ВЕКТОР МОНИТОРИНГА ПТЭС**

1. **Нумерация вектора.** Данный пункт характеризует порядковый номер вектора мониторинга, которых может быть от одного до  $n$ -го количества в зависимости от количества защищаемых объектов или направлений (защищаемые объекты могут находиться в пределах одной оси). Вектор может иметь цифровую, буквенную, либо комбинированную нумерацию (например, «вектор мониторинга А1»). Количество векторов будет свидетельствовать о сложности объекта наблюдения, либо о детальности мониторинга.

2. **Направленность.** Данный пункт характеризует направленность наблюдения и определяется направлением контроля от техногенного источника в сторону расположения защищаемого объекта. Направленность может выражаться парной комбинацией (например, «очистные сооружения  $\Rightarrow$  одиночный водозабор»).

3. **Протяженность** (в километрах). Данный пункт характеризует протяженность вектора мониторинга, что позволяет сравнивать векторы между собой по степени удаленности защищаемых объектов, а также отражает оцениваемую площадь влияния техногенного объекта (реальную и потенциальную).

4. **Структура вектора.** Данный пункт характеризует структуру вектора и количество элементов, выделенных в нем, а также основание для выделения. Элементов может быть минимальное количество — два (элементы Т и Z), среднее — три (элементы Т, Р, Z) или четыре (элементы Т, ST, SZ, Z), и полное — пять (элементы Т, ST, Р, SZ, Z). Количество элементов зависит от финансовых и технических возможностей заказчика, а также от необходимости решения тех или иных задач на данном участке контроля. Соответственно, при обосновании количества элементов оси, обосновываются и их границы, определенные по тем или иным критериям. В качестве критериев могут выступать техногенные, гидродинамические, геоморфологические, литологические и др. факторы. Самым простым представлением границ может быть геометрически равномерное деление оси. Последнее логично при изотропности среды исследования.

5. **Характеристика элементов структуры.** Данный пункт характеризует элементы векторной оси. Например, «элемент Т» — это подземные воды залегающего первым от поверхности водоносного горизонта в пределах территории промплощадки предприятия; «элемент Z» — это подземные воды эксплуатационного горизонта в пределах участка водозабора и т.д.).

6. **Наблюдательные пункты.** Данный пункт характеризует наблюдательные пункты в пределах вектора, по которым оценивается состояние его элементов. Приводится нумерация пункта, его вид и назначение (например, участок Т — скважина №1, контролирующая УПВ и химический состав вод водоносного горизонта в пределах промплощадки предприятия).

7. **Основной вид связи элементов.** Данный пункт характеризует основной вид связи между элементами. Элементы могут быть связаны между собой гидравлически в форме конвекции, диффузии, гравитационной дифференциации, дренирования, инфильтрации и др.; механически — в форме статического или динамического сонахождения и др. Форма связи должна отра-

жать основной характер взаимодействия элементов.

8. *Вид нарушения устойчивости системы.* Данный пункт характеризует вид нарушения устойчивости в пределах вектора — развитие процессов загрязнения, подтопления, растворения пород, деформаций оснований инженерных сооружений и др.

9. *Факторы, выводящие систему из устойчивого состояния.* В данном пункте характеризуются основные факторы, выводящие систему из равновесного состояния в пределах оси. Это могут быть техногенные стоки, утечки, нарушение технологического режима, изъяны технологического цикла и др.

10. *Количественные показатели влияния негативных факторов.* Данный пункт количественно характеризует показатели техногенного влияния в пределах оси. Это могут быть концентрации химических соединений в подземных водах и т.д. Например, концентрации нитратов в пределах участка «Т» — 2000 мг/л, в пределах участка «СТ» — 850 мг/л.

11. *Гомеостатические пределы (границы устойчивости) вектора.* Данный пункт характеризует пределы устойчивости вектора как структурной оси ПТЭС. Характеристика дается по участкам SZ и Z. Если устойчивость оценивается по загрязняющим компонентам подземных вод, то пределом устойчивости для участка Z будут значения ПДК, а для участка SZ — либо значения ПДК, либо же некоторые значения параметра, определенные прогнозным путем, связывающие данное значение с ПДК для участка Z (например, по нитратам — 45 мг/л для участка Z и 65 мг/л — для участка SZ).

12. *Тенденция изменения устойчивости участков природной среды в пределах вектора.* Данный пункт отражает динамику изменения состояний ПТЭС в многолетнем разрезе. Здесь приводится информация об ухудшении ситуации, ее стабилизации или улучшении по определенным параметрам за некоторый промежуток времени. Приводится краткая характеристика причин.

13. *Прогнозные оценки изменения состояния элементов вектора.* Данный пункт отражает результаты выполненного прогноза по тем или иным параметрам на некоторый промежуток времени. На основании прогнозных решений вырабатываются соответствующие контролирующие и управленческие решения.

14. *Рекомендуемые управленческие мероприятия.* Данный пункт отражает рекомендуемые мероприятия, направленные на сохранение или возврат системы в устойчивое положение. Отмечается их выполнение (невыполнение) и эффективность.

Вектора монитора можно классифицировать по их устойчивости и направленности.

13. *Классификация векторов мониторинга ПТЭС* — подразделение векторов мониторинга по оценочным параметрам. Векторы мониторинга классифицируются по устойчивости и направленности

Классификация векторов мониторинга по их устойчивости

Векторы мониторинга предлагается классифицировать как:

1. Устойчивые векторы (устойчивы по всем ярусам);

2. Неустойчивые векторы по ярусам SZ;

3. Неустойчивые векторы по ярусам SZ и Z.

Неустойчивые векторы по ярусам SZ и Z требуют неотложного применения управленческих мероприятий.

Классификация векторов мониторинга по их направленности

Вектора мониторинга предлагается обозначать в соответствии с их значимостью, направленностью влияния, определяемой направлением перемещения загрязняющих веществ (или чем-либо иным) и характером защищаемых объектов, что часто совпадает с их значимостью.

Наиболее традиционными защищаемыми объектами являются подземные воды питьевых водозаборов (эксплуатационные скважины), колодцев (родников) частного водоснабжения и поверхностные воды рек и озер (водохранилищ).

Относительно направленности миграционного потока защищаемые объекты могут быть расположены либо ниже по потоку относительно техногенного объекта, либо в крест протирания потока, либо выше по потоку относительно техногенного объекта, либо в их комбинации. Предлагаются следующие обозначения.

По направленности предлагается обозначать:

I — расположение защищаемого объекта ниже по потоку относительно техногенного объекта;

II — расположение защищаемого объекта в крест протирания потока относительно техногенного объекта;

III — расположение защищаемого объекта выше по потоку относительно техногенного объекта;

I-II, II-III — расположение объекта между осями.

По характеру защищаемых объектов:

A — реки (и другие общественно значимые водотоки и водоемы);

B — эксплуатационные питьевые водозаборы;

C — колодцы (родники) частного водоснабжения.

Таким образом, обозначение вектора мониторинга может иметь вид I-A, II-C, I-II-C а также I-A1, I-A2. В последнем случае — при значимой протяженности защищаемого объекта, когда он контролируется несколькими векторами.

Предложенные классификации позволяют формализовать векторы мониторинга в их именованной части, что становится значимым не только при мониторинге какой-либо конкретной ПТЭС, но и при учете мониторинговых работ в системе государственных надзорных органов, позволяя проводить статистический контроль и анализ защищаемых объектов по их значимости и устойчивости.

Представленный понятийно-терминологический аппарат был практически адаптирован при организации мониторинга ПТЭС «ОАО «Минудобрения» — природная среда» (г. Россошь) и ПТЭС «нефтехранилище «Красное Знамя» — природная среда» (г. Воронеж) и в силу своего универсального характера может использоваться при организации мониторинга любых ПТЭС [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зинюков Ю.М. Методические основы конструирования и анализа структурно-иерархических моделей природно-технических экосистем // Вест. Воронеж. ун-та. Геология. — 2001. — № 11. — С. 210-222.
2. Зинюков Ю.М. Методические основы организации мониторинга природно-технических экосистем на основе их структурно-иерархических моделей // Вест. Воронеж. ун-та. Геология. — 2002. — № 13. — С. 235—242.
3. Зинюков Ю.М. Теоретико-методологические основы организации мониторинга природно-технических экосистем на основе их структурно-иерархических моделей // Труды научно-исследовательского института геологии Воронежского госуниверситета. — Вып. 28. — Воронеж, 2005. — 164 с.