



УДК 517:502.35:502.55 (470.324)

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА СТРУКТУРНО-ИЕРАРХИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЭКОСИСТЕМ

Ю.М.Зинюков

Воронежский государственный университет

Оптимизация мониторинга природно-технических экосистем связывается с разработкой и внедрением методики конструирования моделей исследуемых систем как сложных природно-техногенных объектов. Для повышения эффективности мониторинга особо пристальное внимание необходимо обращать на его начальный этап – этап организации, на котором создается модель изучаемого объекта и определяется методика контроля, прогноза и управления его состоянием. Моделирование природно-технических экосистем как принципиально новых типов систем производится на основании двухцелевого подхода (производственного и экологического) и ряда критериев, по которым в конечном счете и конструируются их модели.

Одним из проблемных моментов системного анализа в геологии является разработка конкретных способов выделения материальных систем в геологическом пространстве и методов их описания как сложных систем. На это в значительной степени должно быть направлено применение принципов системного подхода и в частности методологии системного анализа [1].

К одной из важнейших задач современной науки можно отнести проблему изучения взаимодействующих природных и техногенных объектов как сложных природно-технических систем (ПТС). Рассматривая данные объекты как элементы единой системы, исследователь во многом облегчает свою задачу, ограничивая бесконечные природно-техногенные взаимодействия строго целевыми рамками, конечными взаимодействиями.

Таким образом, системный анализ призван разрешать экологические проблемы, возникающие с ростом техногенной нагрузки на природную среду. Данный метод научного исследования оказывается практически единственным методом, претендующим на высокую эффективность при организации и ведении мониторинга природно-технических систем. При этом конструируемая система выступает как средство достижения цели (решения проблемы).

Моделирование природно-технических систем является довольно сложной задачей. Различные этапы моделирования далеко не всегда подлежат формализации, а некоторые не формализуются вообще. Проблемными моментами являются все стадии системного построения: выбор элементов системы, выявление структуры системы и уровней ее организации, определение существенных связей и

отношений между элементами системы и в конечном счете - механизма ее функционирования.

Прежде чем приступить к анализу характера взаимодействий природных и техногенных объектов как сложных природно-технических систем, необходимо рассмотреть общий алгоритм конструирования систем на примере анализа искусственно созданных объектов (технических систем), что позволит полнее уяснить встающие перед исследователем проблемы.

Общий алгоритм конструирования искусственных систем

Конструирование системы начинается с формулирования цели (образа модели желаемого будущего [2]). Цель создания какого-либо объекта-системы определяется потребностями общества или какой-либо его части. Для достижения поставленной цели и создается необходимый объект, который будет представлять собой систему, состоящую из определенного набора элементов. Выбор элементов предопределяется наличием у них определенных для этого свойств. Другими словами, мы подбираем объекты с определенными свойствами, которые и будут определять функции этих объектов в системе. Таким образом, от функций элементов в системе зависит их набор и взаимоотношения. Отношения и связи между элементами данной системы определяют структуру системы. Функции элементов, определенным образом связанных между собой, определяют организацию системы и условия ее функционирования. Оптимальное функционирование системы (главное свойство системы) отвечает поставленной цели ее создания.

В такой системе обычно выделяют главные и второстепенные элементы в соответствии с выполняемыми ими функциями, зависящими от их свойств. От уровня выполняемых элементами функций зависят и их взаимоотношения. Таким образом, структура системы определяется не только содержательной стороной функций элементов, но и уровнем выполняемых ими функций. Организация технической системы происходит вокруг ее главных элементов. Так для крупного промышленного предприятия главными элементами будут являться производственные цеха и сооружения, все остальные элементы инфраструктуры – пути сообщения (железнодорожные и автомобильные), энерго- и теплосети, коммуникации, газо- и водопроводы, канализация и т.д., будут выполнять вспомогательные функции (для отдельных предприятий можно наблюдать и обратную картину).

Так выглядит общий алгоритм конструирования технических (искусственных) систем.

Системный анализ искусственно созданных объектов – задача тривиальная, так как создание таких объектов четко и чаще всего однозначно определяется конкретной целью. Собственно целью определялся и набор компонентов системы, которые, в свою очередь, определяли ее структуру, а функционирование системы обеспечивало достижение поставленной цели.

Совершенно иначе и сложнее обстоит дело, когда потребности общества ставят перед нами цели, для достижения которых мы вынуждены не создавать искусственные объекты, а работать с уже имеющимися в природе, которые часто предстают как достаточно сложноорганизованные и непрерывные, недискретные в пространстве. Для моделирования сложных объектов исследователь вынужден обращаться к методам системного анализа и, в конечном счете – конструировать абстрактную модель изучаемого объекта.

Еще более сложными являются задачи, когда возникает потребность в изучении природных и техногенных объектов в их взаимодействии, так как такие взаимодействия являются наиболее сложными и многообразными. При этом, такие объекты необходимо рассматривать как единую природно-техническую систему, иначе не удастся никогда получить главного системного свойства объекта-системы. Изучение таких сложных систем также необходимо проводить с конструирования их абстрактных моделей. При этом, исследователь-эксперт в сущности проводит обратную операцию в сравнении с анализом технических систем, вычлняя системы из уже существующих образований.

Важнейшим здесь является то обстоятельство, что процедура такого вычленения (абстрагирование объекта-системы из общей совокупности объектов) оказывается одинаковой при системном анализе для всех рассмотренных случаев моделирования технических, природных и природно-технических систем.

Общий алгоритм моделирования природно-технических систем

Инициирование системных исследований предопределяется социальными запросами, интересами, потребностями. Потребности общества формулируют определенные цели, которые и призваны обеспечить удовлетворение данных потребностей. Для их достижения эксперт-исследователь определяет соответствующие задачи. Далее процедура системного исследования происходит в указанном ранее порядке. Система вычленяется исключительно по целевому признаку, так как разобраться во всем многообразии всевозможных функций объекта можно лишь в том случае, когда будет четко сформулирована цель наших исследований, когда будет четко указано с какой точки зрения мы хотим рассмотреть объект и какова основная функция этой системы [1]. Другими словами, любая модель, каким бы способом она не была построена, обладает познавательной ценностью только в том случае, если она сконструирована в соответствии с определенными целями и задачами [3].

Из изложенного становится понятно, почему при изучении взаимодействий техногенных объектов с геологической средой мы опирались на целевой системный подход, как наиболее прогрессивный метод изучения сложных объектов [4]. Так, например, одно из крупнейших предприятий химической промышленности – ОАО «Минудобрения» г. Россошь Воронежской области и взаимодействующую с ним геологическую среду мы рассматривали как единую природно-техническую систему. В этой системе (техническая подсистема), созданный со строго определенной целью. Природной подсистемой является геологическая среда, созданная природой без какой-либо определенной цели (возможно, правда, что такая цель и существует, но на нашем уровне познания она еще не определена). Вычленение такой системы из окружающей среды, т.е. конструирование абстрактной модели взаимодействующих природных и техногенных объектов, обуславливается специфическими потребностями общества.

В рассматриваемом случае, потребности общества в минеральных удобрениях и в других химических продуктах поставили перед промышленниками цель – произвести соответствующую продукцию (нитроаммофоску, аммиачную селитру, аммофос, аммиак, азотную кислоту и др.), так как известно что сельскохозяйственная продукция в странах с развитым сельским хозяйством увеличивается на 50-60% в результате применения минеральных удобрений. Для достижения указанной цели и был спроектирован целый ряд химических производств, к числу которых относится и Россошанский химический комбинат (ОАО «Минудобрения»), введенный в эксплуатацию в 1974 году. Потребностями общества в недорогой электроэнергии было обусловлено строительство атомных электростанций. Так произ-

водство электроэнергии для Воронежской области – главная цель строительства и эксплуатации Нововоронежской АЭС. И так для любого техногенного объекта.

И вот здесь то автоматически возникают новые проблемы, и проблемность данной ситуации заключается в том, что, наряду с потребностью в промышленной продукции, общество также имеет потребность и в чистом воздухе, и в качественной питьевой воде, и в чистых реках, и в плодородных почвах.

Таким образом, строительство и эксплуатация крупного техногенного объекта поставили под сомнение удовлетворение потребности населения в чистой природной среде. В связи с этим, в обществе появляются потребности **противоположные** по своему характеру – наличие и минеральных удобрений и чистой природной среды, наличие и электроэнергии (на ядерном топливе) и чистой природной среды и т.д. Такой поворот автоматически ведет к трансформации цели существования данной ПТС, ее раздвоению.

Первая цель - производство продукции (минеральных удобрений, электроэнергии и др.), вторая цель - минимизация негативных последствий эксплуатации техногенного объекта (химического комбината, АЭС и др.). Отмечается очевидное раздвоение цели. Одна цель ориентирована на технические объекты, другая – на природные. При этом, имеет место и единая **общая цель** – обеспечение оптимального функционирования рассматриваемой системы, позволяющее осуществлять выпуск экономической продукции с нанесением минимального экологического ущерба.

Однако существующие в ПТС связи между природными и техногенными объектами, являясь результатом их тесного взаимодействия, стали столь велики и качественно иными, что ни одна из подсистем уже не в состоянии выполнять возложенные на всю систему социально-экономические функции [5]. Наступает этап совместных действий технических работников и ученых, когда, по сути дела, конструируется новый предмет научного исследования, связанный с представлениями о взаимодействующих между собой объектах природного и техногенного происхождения как единых системных образованиях. При этом, возникает необходимость рассматривать данную совокупность объектов как новый объект научного исследования, а системный анализ – как инструмент его изучения.

Однако сам по себе системный подход, предполагающий раскрытие внутренней сущности сложного объекта, не дает формального аппарата для его изучения. В каждом конкретном случае средства формализации и решения могут существенно отличаться в зависимости от поставленных задач [4].

В случае изучения природно-технических систем, особенности применения системного анализа определяются двойственным характером цели исследования и спецификой самих изучаемых объ-

ектов. В качестве одного из примеров системного исследования ПТС рассмотрим уже упомянутый химический комбинат ОАО «Минудобрения».

Данное предприятие функционирует как сложная многоуровневая система. По целевому признаку, оптимальное функционирование такой системы обусловлено управлением внутри самой системы с целью обеспечения условий нормальной и безопасной эксплуатации всех зданий и сооружений комбината. Управляющие воздействия такого типа позволяют комбинату выполнять свою основную экономическую задачу – выпускать продукцию в соответствии с заказами (планами). Данному химкомбинату присущи все особенности системной организации объектов: целенаправленность, целостность, элементность, структурность, иерархичность – в первую очередь потому, что данный объект целенаправленно (искусственно) создан. Поэтому, его главное (системное) свойство, как и для любого техногенного объекта, с очевидностью определяется самой целью его создания. Другими словами, так называемое эмерджентное свойство данной системы – это есть способность комбината осуществлять выпуск плановой продукции, или иначе - быть комбинатом по производству минеральных удобрений.

Для того, чтобы осуществлять выпуск продукции, а тем более выпускать продукцию в соответствии с планами комбината, необходимо, чтобы все элементы данной технической системы работали слажено, то есть, уровень ее структурной организации отвечал целям стоящим перед комбинатом. Другими словами, чтобы все здания, сооружения, коммуникации ОАО «Минудобрения» правильно выполняли свои функции, чтобы технологический режим, исправность оборудования, кадровый состав, наличие сырья и другие факторы способствовали решению поставленных задач. Оптимальное взаимодействие указанных элементов в соответствии с их назначением (по законам композиции [6]) и будет обеспечивать надлежащее функционирование данной системы.

Вся производственная инфраструктура ОАО «Минудобрения» представлена элементами технической системы. Однако данное предприятие не изолировано от природы. В частности, его здания, сооружения, коммуникации, часть продукции, сырье, отходы и т.д. оказываются расположенными на грунтовых основаниях, которые также необходимы комбинату для его нормального функционирования, как и любая коммуникация, производственный цех, градирня, очистные сооружения и др. Таким образом, грунты (горные породы) автоматически становятся неотъемлемой составляющей рассматриваемой системы ОАО «Минудобрения», которые, выполняя свою основную функцию – обеспечение устойчивости зданий и сооружений, – способствуют комбинату осуществлять выпуск плановой продукции (реализовывать главное системное свойство).

В итоге, получается, что наряду с техническими составляющими данной системы, в нее вхо-

дят и природные элементы, что уже дает основание именовать данную систему как природно-техническую (каковой она на самом деле и является). Однако на начальном этапе анализа мы пока этого делать не станем и будем рассматривать исследуемый объект по-прежнему, как техногенную систему, так как требования к существованию данной системы изначально определялись единственной целью - производственной.

Как уже отмечалось выше, главная цель существования исследуемой системы может быть достигнута только при слаженном оптимальном функционировании всех ее составляющих. А возможным это становится только тогда, когда система находится в равновесии (в состоянии гомеостаза [7]). В случае же, когда какой-либо элемент перестает нормально функционировать, может нарушиться и функционирование других элементов, тесным образом с ним взаимосвязанных, и система может выйти из равновесного – допустимого по целевым задачам – состояния. Такие изменения могут происходить, как с техническими составляющими системы (нарушение технологического цикла, износ оборудования, отсутствие сырья, неправильный режим эксплуатации сооружений и др.), так и с природными элементами (деформации грунтов основания и связанные с ними осадки и крены фундаментов, разрушение откосов дамб гидротехнических очистных сооружений, суффозионные провалы и др.). Степень выхода системы из равновесия сказывается на способности комбината осуществлять выпуск плановой продукции. Если степень выхода достаточно высока, то комбинат оказывается неспособным выпускать требуемую продукцию, то есть то ее количество, которое определено планом (годовым, квартальным, суточным и т.д.).

При выходе системы из равновесия возникает необходимость ее возврата в устойчивое состояние, то есть осуществляется процедура управления. При этом, администрация комбината перераспределяет финансовые и производственные ресурсы для устранения нарушенных связей в системе (затраты на апробацию новых технологий, закупка нового оборудования, затраты на исследовательские работы, на восстановление разрушенных дамб гидротехнических сооружений, затраты на контроль за деформациями фундаментов, на ликвидацию провалов земной поверхности на промплощадке и др.). Размер затрат напрямую связан с выбором методов решения указанных проблем и их своевременностью. Чем дольше затягивается их решение и чем менее научными являются методы разрешения проблемной ситуации, тем дороже это обходится комбинату и обществу в конечном счете. Поэтому, своевременный прогноз развития негативных процессов, осуществляемый на современной научной и методической основе, а также разработка мероприятий по их ограничению и устранению относятся к приобретениям предприятия, к экономии его финансовых и производственных ресурсов.

Таковы основные принципы и законы системного функционирования крупных техногенных объектов, к числу которых относится и ОАО «Минудобрения».

Нормальная эксплуатация такого предприятия приносила бы ожидаемую от нее социально-экономическую пользу: система функционировала, комбинат бы выполнял свои задачи, государство получало минеральные удобрения, работники предприятия – заработную плату, премии, благодарности и т.д.; если бы наряду с эксплуатацией комбината автоматически не возникала новая проблемная ситуация. Появление такой ситуации связано как с нарушением условий эксплуатации отдельных сооружений комбината, так и с самим фактом существования такого крупного техногенного объекта. Этой проблемой становится загрязнение окружающей природной среды. И если работники комбината могли бы спокойно и дальше продолжать свою деятельность, то жителей окрестных населенных пунктов (г.Россошь, с.Евстратовка, с.Морозовка, с.Колбинское и др.) такая деятельность комбината полностью уже устраивать не может. Наступает момент, когда состояние природной среды перестает удовлетворять требованиям, предъявляемым государством к охране недр и водных ресурсов. Более того, техногенные изменения геологической среды уже отрицательно сказываются и на нормальной эксплуатации отдельных сооружений самого комбината. Имеет место подтопление промплощадки, разрушение дамб шламонакопителей, провалы земной поверхности на территории промплощадки, выщелачивание бетона фундаментов некоторых сооружений агрессивными по отношению к ним подземными водами и др.

Таким образом, эксплуатация комбината, подчиненная лишь одной цели его существования - выпуску продукции, - на сегодняшний день не может уже устраивать ни местное население, ни руководство самого предприятия, ни государство в целом. В связи с этим, соответственно изменяются и требования к оптимальному функционированию такой системы, которые обуславливаются уже не одним, а двумя типами управляющих воздействий: управлению внутри природно-технической системы с целью обеспечения условий нормальной и безопасной эксплуатации всех зданий и сооружений и управление взаимодействием ПТС с окружающей природной средой.

Управляющие воздействия первого типа позволяют комбинату выполнять свою основную **экономическую** задачу – выпускать продукцию в соответствии с заказами, управляющие воздействия второго типа позволяют комбинату решать основную **экологическую** задачу – минимизировать негативное воздействие на окружающую среду в соответствии с социальными требованиями общества. Таким образом, возникает необходимость в расширении исследуемой системы и вхождением в нее природной составляющей в качестве самостоятельной под-

системы (помимо грунтовых оснований включается геологическая среда промплощадки в целом и прилегающих к ней территорий). В связи с этим, моделируемая исследователем система значительно усложняется и в своем составе имеет как искусственные объекты, так и объекты природного происхождения (горные породы, почвы, подземные и поверхностные воды, воздушную среду, атмосферные осадки, биоту). В итоге, исследования взаимодействий природных и техногенных объектов ведутся в рамках изучения данного взаимодействия как функционирования единой природно-технической системы «ОАО «Минудобрения» - природная (геологическая) среда».

При этом, следует особо подчеркнуть, что конструирование природно-технических систем в широком понимании, по нашему мнению, получает свой смысл лишь при достижении двух взаимно противоположных целей. В противном случае, самым простым решением проблемы загрязнения окружающей природной среды было бы закрытие химического комбината, то есть ликвидация технической подсистемы, а значит и самой ПТС в ее исходном виде.

Поэтому, при решении только лишь вопросов охраны окружающей среды, техногенные объекты рассматриваются исключительно в качестве внешних источников негативного воздействия на природные объекты-системы. В случаях же, когда решаются только производственные задачи, в качестве систем рассматриваются только технические объекты, природные же объекты при этом играют лишь вспомогательную роль, выступая как внешние факторы. Поэтому, решение комплексных задач следует искать не в изоляции технической подсистемы ПТС (формально – ликвидации ПТС), а в создании и поддержании оптимального в социально-экономическом отношении режима ее функционирования [8].

При этом возникает необходимость в использовании нового понятия, отражающего **двух целевое** видение объекта исследования. Таким понятием может служить понятие **«природно-техническая экосистема» (ПТЭС)**, под которой нами понимается определенная целевыми соображениями совокупность природных и техногенных объектов, объединение которых связывается с решением двух задач: основной производственной задачи – выпуском промышленной продукции (или какой-либо другой цели, определяемой назначением объекта), и основной экологической задачи – минимизации негативного воздействия техногенного объекта на природную среду [9].

Понятие «природно-техническая экосистема» отличается от традиционно употребляемого понятия «природно-техническая система», хотя и во многом отвечает ему по смыслу. При этом, можно было бы оперировать последним, если бы ни его определенная ограниченность. Так, появление природно-технической системы автоматически связывается с появлением любого инженерного сооружения или

комплекса инженерных сооружений в силу того, что в качестве природной составляющей в данную систему непременно входит и грунтовая толща как основание инженерных сооружений. Однако вхождение в систему природных элементов (грунтов), в этом случае направлено на достижение лишь технической (производственной) цели. Появление же экологической проблемы влечет за собой и корректировку цели существования природно-технической системы. В связи с этим, имеют место уже две цели функционирования ПТС. Поэтому, и возникает необходимость в расширении состава изучаемой системы. На наш взгляд, понятие «природно-техническая экосистема» может целесообразно отражать специфику исследования указанных выше природно-технических взаимодействий. И в конечном счете, можно констатировать об открытии **принципиально нового типа сложных систем**.

Таким образом, мы приходим к выводу, что сложные природно-технические экосистемы, к числу которых относится и ПТЭС «ОАО «Минудобрения» – геологическая среда» моделируются и исследуются с учетом достижения **двух взаимно противоположных** целей.

Отношения противоположных по своему происхождению объектов – техногенных и природных, - а также отношения сходных по природе объектов - природных и природных, техногенных и техногенных, - регламентируются законом системной противоречивости ОТС Ю.А.Урманцева, гласящим, что любой системе присущи: подсистема противоречий как совокупность пар взаимно противоположных элементов, связанных отношениями единства и «борьбы» и подсистема непротиворечий как совокупность взаимно непротивоположных элементов, связанных отношениями непротиворечия [6]. Таким образом, мы приходим к выводу, что само наличие техногенного объекта есть основание для создания ПТЭС, которое подтверждает одно из общих положений моделирования, что одним из необходимых признаков полноты модели является наличие в ней противоречивых элементов [2].

Обязательной операцией в изучении систем также является моделирование их динамики, так как любая система либо находится в состоянии покоя, либо движется (изменяется). Различные состояния системы, их смена – и есть движение системы. Чтобы оценить ее движение, необходимо знать ее состояние в различные промежутки времени. Под состоянием ПТС понимается совокупность природных и технических параметров, определяющих ее функционирование в некоторый момент времени [10].

ПТЭС «ОАО «Минудобрения» - геологическая среда» – это достаточно сложная система, состоящая из большого набора элементов различной природы. Состояние данной системы характеризуется состоянием взаимодействующих между собой элементов системы. Оценить состояние системы на какой-то период времени можно лишь предварительно оценив состояние ее элементов. Другими

словами, при оценке состояния системы используется индуктивный метод. Весь ход рассуждений при системном исследовании данного объекта подчиняется закону системности и хорошо прослеживается при его адаптации на примере структурного анализа ПТЭС и в частности ПТЭС «ОАО «Минудобрения» – геологическая среда».

В качестве природной составляющей - геологической среды - в ПТС входят горные породы, подземные и поверхностные воды, являющиеся основными элементами первого порядка. Предельными элементами рассматриваемой системы, элементами самого низкого уровня, которые мы визуально наблюдаем и исследуем, являются «пробы» («образцы») воды и грунта, т.е. определенная часть изучаемого объекта традиционно используемая в естественных науках для оценки объекта в целом.

Согласно закону системности любой элемент данной системы можно рассматривать как самостоятельную систему. Так, например, система «проба воды» – предельный элемент ПТС – есть система, состоящая из определенного набора взаимосвязанных между собой химических элементов (соединений) – Н, О, Са, Mg, Na, HCO₃, NO₃ и т.д. Их количество и состояние и определяют состояние системы «проба воды». Состояние системы «образец грунта» будет определяться количеством и состоянием составляющих элементов – минеральных зерен, агрегатов, органических остатков, влаги и т.д.

Поскольку для оценки объекта отбирают, как правило, несколько проб, то их и соотносят друг с другом. Пробы отличаются друг от друга характеристиками составляющих их элементов. Так, условная система «проба воды №1» будет хоть немного, но отличаться от системы «проба воды №2», система «проба воды №2» будет отличаться от системы «проба воды №3» и т.д. Например, в системе «проба воды №1» содержатся ионы аммония и нитрат-ионы, а в системе «проба воды №2» ион аммония отсутствует. Или же ионы аммония и нитрат-ионы содержатся в обеих системах, но в первой системе концентрации аммония составляют одно количество (например - 0,3 мг/л), а во второй – другое (~ 20 мг/л). Таким образом, данные системы не равны друг другу (не тождественны).

Итак, по состоянию элементов (их концентрациям и формам нахождения) оценивается состояние системы «проба воды №1». Система «проба воды №1», как и система «проба воды №2» и др., в свою очередь принадлежит к системе объектов «данного рода» (по Ю.А. Урманцеву). Так система «проба воды №1 верхнемелового водоносного горизонта» (широко развитого в пределах территории ОАО «Минудобрения») принадлежит системе «все пробы воды верхнемелового водоносного горизонта». К этой же системе могут относиться и «проба воды №2» и «проба воды №3» и т.д., то есть те пробы, которые отобраны из данного водоносного горизонта.

Система «все пробы воды верхнемелового водоносного горизонта» отвечает системе «подземные воды верхнемелового водоносного горизонта», состояние которой будет определяться состоянием совокупности (множества) проб воды данного горизонта (пробы №№1,2,3 и т.д.).

При анализе состояния водоносного горизонта (важнейшего компонента геологической среды), ход рассуждений выглядит следующим образом: подземные воды данного горизонта это система, состоящая из определенного набора химических элементов (соединений). Однако оценку состояния вод горизонта в целом мы традиционно производим по единичным пробам, по отдельным точкам наблюдения, то есть дискретно, так как исследование природного объекта, в данный момент - подземных вод (геологической среды) – в его непрерывности и бесконечности, в настоящее время не представляется возможным. Поэтому, для оценки состояния вод горизонта мы и рассматриваем «пробы» воды в качестве его составных частей (элементов), игнорируя оставшуюся без наблюдения большую часть вод данного горизонта. Такова специфика геологического исследования – по дискретным наблюдениям результаты интерполируются на весь изучаемый объект.

В продолжение рассуждений, определяем, что система «подземные воды верхнемелового водоносного горизонта района ОАО «Минудобрения» принадлежат к системе объектов (R-системе) одного и того же рода «подземные воды района ОАО «Минудобрения»». И состояние системы «подземные воды района ОАО «Минудобрения»» мы оцениваем по состоянию элементов данной системы, к которым относятся все значимые водоносные горизонты исследуемой территории: «подземные воды верхнемелового горизонта района ОАО «Минудобрения», «подземные воды аллювиального верхнечетвертичного горизонта района ОАО «Минудобрения», «подземные воды аллювиального современного горизонта района ОАО «Минудобрения» и др. Причем, очень важной особенностью (свойством) изучаемого объекта является то, что, например, систему «подземные воды верхнемелового горизонта района ОАО «Минудобрения» можно отнести к двум различным родовым системам:

1. R-система – подземные воды верхнемелового водоносного горизонта долины реки Черная Калитва (географическое положение ОАО «Минудобрения»).

2. R-система – подземные воды района ОАО «Минудобрения».

В первом случае мы имеем возможность сравнивать изучаемые воды с общим состоянием подземных вод данного верхнемелового горизонта в регионе. Во втором случае – рассматривать их как часть подземных вод изучаемого района. Таким образом, проявляется новое системное свойство объекта – **двойная принадлежность** ближайшим родо-

вым системам, имеющее важное значение при оценке состояния изучаемых объектов.

В свою очередь, система «подземные воды района ОАО «Минудобрения» является частью системы «геологическая среда (природная подсистема ПТС) района ОАО «Минудобрения», а также элементом системы «подземные воды долины реки Черная Калитва». Ее состояние, наряду с состоянием других элементов (горные породы, почвы, поверхностные воды) определяют состояние системы «геологическая среда района ОАО «Минудобрения». Последняя, в свою очередь, является частью системы «геологическая среда долины реки Черная Калитва», что позволяет системно сравнивать состояние геологической среды района ОАО «Минудобрения» с общим состоянием геологической среды в регионе и т.д. Таким образом, мы приходим к следующим выводам:

1) оценка состояния объекта-системы производится по состоянию ее элементов;

2) совокупность состояний объектов-систем одного и того же рода определяет состояние «родовой» системы;

3) принадлежность объекта-системы системе объектов одного и того же рода позволяет не только оценивать состояние последней, но и сравнивать данный объект с другими подобными объектами;

4) отнесение любого объекта-системы к системе объектов одного и того же рода по иерархическому принципу – это не только доказательство системной организации объектов, но и важнейший методологический прием изучения различных объектов, без которого при корректном применении системного анализа исследователю не обойтись.

Итак, для оценки состояния системы необходимо на начальном этапе построить ее структурную схему, являющейся наиболее подробной и полной моделью любой системы [2], отражающую набор элементов системы и их взаимоотношения, по состоянию которых и будет оцениваться состояние всей системы в целом. Одним из основных системных принципов, тесно связанных со структурностью, является иерархичность. Иерархический способ построения модели позволяет ей успешно работать при различной детальности, формализованности ее составных частей. Теоретическая модель представляет строение ПТЭС в виде «иерархической системы структурных уровней, каждый из которых характеризуется своим комплексом элементов определенного ранга» [11,12].

Как уже указывалось выше, структура техногенного объекта (технической подсистемы ПТЭС) определяется проектом на его создание. Выбор элементов данной подсистемы и их отношения предопределены их функциями. Вовлечение в систему природных объектов также определяется их ролью, которую они могут выполнять благодаря своим свойствам. Функции элементов природной подсистемы определяют связи между ними и элементами технической подсистемы. ПТЭС могут отличаться

по числу уровней, рангам и составу элементов в зависимости от принципов моделирования, природы объектов, целей их изучения и признаков выделения элементов. Функции элементов системы приходится устанавливать в каждом конкретном случае, ибо природные объекты весьма многообразны и изменчивы. Учитывая это, трудно рассчитывать на то, что когда-нибудь будет создан свод нормативов, вполне учитывающий дифференцирование свойств, а также поведение природных объектов и их взаимосвязей в рамках мыслимых видов ПТС [13].

Более эффективным будет установление оценочных критериев. В связи с этим, одной из главных операций на начальной стадии конструирования ПТЭС становится выбор критериев, по которым природные объекты будут вовлекаться в систему, другими словами - производится набор элементов природной подсистемы ПТЭС.

Критерии вовлечения предлагается подразделить на две группы:

1. критерии, определяемые целью создания техногенного объекта – выпуском экономической продукции;

2. критерии, определяемые появлением второй цели – конструированием ПТЭС в целях минимизации негативных воздействий сооружений предприятия на геологическую среду.

Для ПТЭС «ОАО «Минудобрения» – геологическая среда» критерии вовлечения природных элементов в систему определялись их функциями и отношениями с элементами технической подсистемы.

Для грунтов (геологических тел) были определены следующие критерии вовлечения:

- выполнение функций несущих оснований;

- выполнение функций фильтрующего материала;

- выполнение функций строительного материала;

- выполнение функций вместилища (сооружений и сточных вод).

Для водных объектов были определены следующие критерии:

- выполнение функций технологического компонента (при использовании в производстве);

- выполнение функций разбавителя сточных вод;

- выполнение функций переносчика химических соединений (сточных вод) в грунтовом массиве (водоносном горизонте);

- выполнение функций пищевого продукта.

Данные критерии определялись производственной целью. Дальнейшее вовлечение природных объектов производится экспертом-исследователем в реализации второй цели – экологической, по следующим критериям:

- подверженность горных пород, подземных и поверхностных вод прямому техногенному воздействию со стороны элементов технической подсистемы;

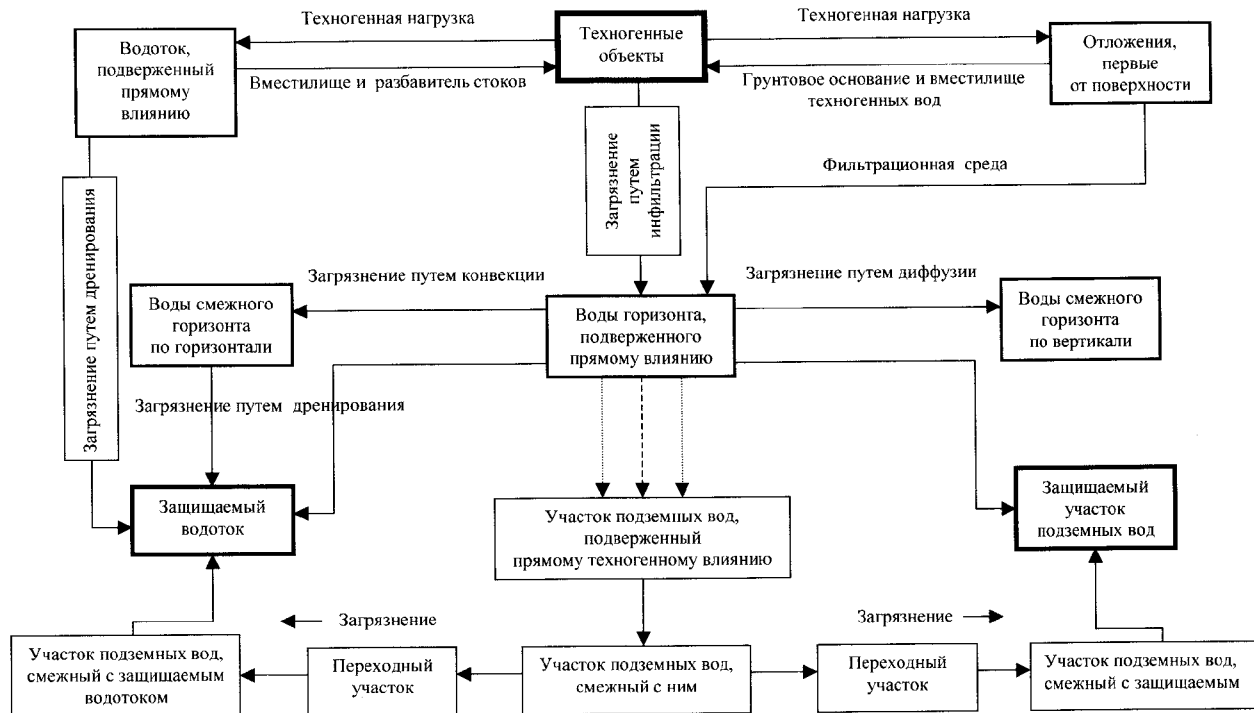


Рис.1. Связи и отношения основных элементов ПТЭС.

- 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.);

- возможность негативного воздействия природных объектов на элементы технической подсистемы (например, при активизации суффозионно-карстовых процессов, развитие процесса подтопления промышленной площадки, агрессивного воздействия подземных вод на бетон фундамента 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, участки питьевых водозаборов и др.);

- принадлежность природных объектов (или их частей) к **смежным** с защищаемыми объектами.

Вообще наличие и местоположение **защищаемых объектов** является определяющим моментом при установлении пространственных границ исследуемой ПТЭС. Таким образом, вектор наблюдения (мониторинга) 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 под-

верженными негативному влиянию со стороны измененных природных объектов; **защищаемые участки** природной среды – значимые водотоки, участки питьевых водозаборов, участки водоносных горизонтов, используемые для частного водоснабжения с помощью колодцев, родников и др.; **участки**, смежные с защищаемыми, так как в силу их загрязненности (нарушенности) наступает прямая угроза последним, и такие участки выполняют роль контрольных, сигнальных участков в защите природных объектов. 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**» (рис.1).

Дополнительно можно использовать критерии для вовлечения атмосферных осадков и биотических компонентов как факторов преобразования геологической среды.

Следующим этапом конструирования модели ПТЭС является выявление структуры системы. Для выявления структуры системы необходимо провести ее декомпозицию. В соответствии с общими приемами [7,14], система разбивается на подсистемы (элементы) 1-ранга (самого высокого структурного уровня), те, в свою очередь, на подсистемы 2-ранга и так далее, до подсистем предельного уровня, определяемого задачами исследования. Однако вопрос о том, на основании чего мы будем выполнять данную операцию – по каким критериям объекты будут

занимать свое иерархическое место в системе, - остается открытым.

Автором предложен критериальный способ выявления структуры ПТЭС [9], когда каждому структурному уровню организации элементов системы соответствует свой критерий, по которому объекты занимают строго определенное место в данной системе. В рассматриваемой нами ПТЭС выделяется семь иерархических уровней организации: от элементов самого высокого уровня, к которым относятся «техническая и природная подсистемы», до элементов предельного уровня, к которой относятся «пробы воды», «образцы грунта» (для природных элементов), «осадочные марки, репера» (для технических элементов) и др.

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

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

2-й уровень организации. Выделяющий признак – «тип объекта». Объекты техногенной и природной подсистемы подразделены по своему характеру на сооружения собственно промышленной площадки, внеплощадочные сооружения (как правило, это очистные сооружения, хранилища), коммуникации (для техногенной подсистемы); на геологические тела, водные объекты, атмосферные осадки, биоту (для природной подсистемы);

3-й уровень организации. Выделяющий признак – «общее наименование объекта» (род объекта). Так, «промплощадка предприятия» (объект техногенной подсистемы) подразделена по роду эксплуатации сооружений на производства, промышленные трубы, хранилища и др. Геологические тела (объекты природной подсистемы) подразделены на горные породы, почвы, донные отложения, искусственные грунты; водные объекты подразделены на подземные воды, поверхностные водотоки и водоемы и др.

4-й уровень организации. Выделяющий признак – «наименование объекта» (вид объекта). Так, среди очистных сооружений выделены шламонакопители, поля фильтрации, пруды-накопители, ливнеотстойники и др. 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.;

5-й уровень организации. Выделяющий признак – «индивидуальное наименование целостного объекта». На этом уровне завершается рассмотрение объекта как целостного образования (для техногенной подсистемы – по техническому проекту, для природной – по принятым в геологии принципам).

Так, шламонакопители подразделены на шламонакопители секций №№1,2а,2б,812,821 и др. Подземные воды подразделены на воды какого-либо участка водоносного горизонта №1 (например, участка А – участка основного водотока, участка Б – участка очистных сооружений и т.д.), воды какого-либо участка водоносного горизонта №2 и др.;

6-й уровень организации. Выделяющий признак – «именованный участок целостного объекта» (представлен в системе понятием «точка (пункт) наблюдения»). Например, «пункт наблюдения №1» (участок шламонакопителя №2); «точка наблюдения №18» (воды верхнемелового водоносного горизонта участка производства аммиака) и т.д.;

7-й уровень организации. Выделяющий признак - «предельный объем (часть) изучения целостного объекта» (представлен в системе понятием «проба воды», «образец грунта», «замер», «осадочная марка»). Это элементарный уровень организации, который в принципе формализуем при решении задач мониторинга ПТЭС.

Предельность объема изучения устанавливается исследователем. Для различных ПТЭС и целей их исследования число уровней организации может меняться как в сторону сокращения, так и в сторону увеличения. Предложенные критерии позволяют видеть всю организацию системы, отвечающую уровню исследовательских задач. При этом соблюден один из основных принципов декомпозиции систем «принцип простоты модели», и в ранжировании данной модели все уровни оказались самоценными, удобными для самостоятельного анализа и последующей организации базы данных при ведении мониторинга ПТЭС.

Далее, при анализе элементов ПТЭС от самого высокого их уровня (природная подсистема) до самого низкого (проба) необходимо особо отметить, что исследователь сталкивается с различным механизмом раскрытия их структуры при рассмотрении данных элементов в качестве самостоятельных систем. При этом, механизм раскрытия структуры оказывается разнотипным. Это следует из анализа элементов по мере снижения их иерархического уровня. ПТС делится на две части – природные объекты и техногенные объекты. Далее природные объекты делятся на горные породы (грунты), подземные и поверхностные воды, биоту. Подземные воды в рамках рассматриваемой системы подразделяются на подземные воды различных водоносных горизонтов. Подземные воды какого-либо водоносного горизонта делятся уже на подземные воды различных частей (участков) этого водоносного горизонта и эти участки представляются отдельными точками наблюдения (скважины, колодцы, родники), согласно принятым в гидрогеологии способам изучения подземных вод.

По совокупности состояний подземных вод разных частей водоносных горизонтов и оценивается общее состояние подземных вод водоносного горизонта в целом. Подземные воды разных частей

изучаемого водоносного горизонта, представляемые в системе «точками наблюдения» подразделяются в пределах этих частей на отдельные объемы воды, представляемыми понятием «проба воды». Такое деление может носить пространственный и временной характер. Например, в условной скважине №1 может быть отобрана (наблюдаться) ни одна проба, а больше – две, три и т.д. Время отбора будет одним и тем же, а пространственное распределение различным (отбор с разных глубин). В случае, когда проводятся режимные наблюдения (мониторинг), будет иметь место повторяющийся отбор проб в одном и том же месте, но в разное время. По состоянию проб мы будем оценивать состояние вод этой части водоносного горизонта на определенный момент времени. По совокупности состояний подземных вод различных частей водоносного горизонта будем оценивать состояние подземных вод всего горизонта. По совокупности же состояний подземных вод различных водоносных горизонтов оценивается общее состояние подземных вод исследуемого района. А в связи с тем, что пространственно-временное положение предельных элементов системы (наблюдаемых «точек наблюдения» и отбираемых «проб воды») есть ничто иное как отражение пространственно-временной структуры сети опробования (наблюдательной сети), мы приходим к выводу, что при решении поставленных задач исследователь сам и определяет окончательную модель структуры объекта-системы, которая, в конечном счете, сводится к выбору сети опробования. Таким образом, постулируется очень важное научное положение – **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 организации и ведении мониторинга природно-технических систем. В связи с этим, уже на начальной стадии изучения ПТЭС, наряду с раскрытием ее структуры (построением структурной схемы модели), важнейшей операцией является организация оптимальной наблюдательной сети, несущей в том числе на себе уже и системную нагрузку (**наблюдательная сеть оказывается тождественной элементарному уровню организации системы!**).

Традиционные правила организации наблюдательной сети в геологии и гидрогеологии изложены в многочисленных руководствах и рекомендациях [15-19], теоретические обоснования достаточно подробно рассмотрены в работах [11,20,21 и др.]. Главным для исследователя остается вопрос их оптимальной адаптации на конкретном объекте исследования, с учетом его системной организации.

Итогом проведения последовательных операций по конструированию ПТЭС является структур-

но-иерархическая модель данной ПТЭС, рассматриваемая как основа организации эффективной системы мониторинга изучаемой ПТЭС, под которой, напомним, в данном случае понимается совокупность природных и техногенных объектов, объединенных по двум целевым признакам.

Первый целевой признак – обеспечение геологической устойчивости инженерных сооружений предприятия в целях выполнения им своей основной производственной задачи. В этом случае в ПТС входят все сооружения предприятия плюс грунты, являющиеся основаниями инженерных сооружений.

Второй признак – обеспечение минимизации негативных техногенных воздействий на геологическую (природную) среду со стороны предприятия (основная экологическая задача). В этом случае в ПТЭС в качестве техногенной составляющей входят объекты, являющиеся источниками негативного изменения геологической среды (основные производства, очистные сооружения, хранилища сырья, продукции и отходов, коммуникации); в качестве природной составляющей – объекты, подверженные техногенному изменению под влиянием сооружений предприятия (горные породы, подземные и поверхностные воды, атмосферные осадки, почвы, донные осадки, биота).

Таким образом, при решении экологической задачи природная подсистема ПТС принимает более развернутый вид. Основными объектами рассматриваемой природной подсистемы являются подземные и поверхностные воды – данные элементы в наибольшей степени подвержены загрязнению и истощению. Горные породы рассматриваются в первую очередь как водоносные горизонты и грунтовые основания; атмосферные осадки – как источник питания подземных вод; органическое вещество – как фактор преобразования химического состава подземных вод.

Оценка состояния элементов системы отвечает таким стадиям мониторинга как «наблюдения» и «анализ результатов наблюдений». Помимо этих циклов основными в системе мониторинга являются процедуры «прогноза» и «управления». Для выполнения данных операций, информации о состоянии элементов системы оказывается недостаточно. Для этого необходимо выяснить причины изменений в состоянии тех или иных элементов системы. Для вскрытия причин выявляются связи и отношения между отдельными элементами системы, которые отражают характер взаимодействия между ними. Выявление связи между составляющими ПТЭС позволяет проводить оценку будущего состояния системы (прогноза), изменять существующее неудовлетворительное состояние (управление) и не допускать нежелательного состояния в будущем. Поэтому, после выявления наиболее значимых элементов ПТЭС и оценки их состояния, наибольшее внимание должно быть уделено выявлению связей между ними.

Элементы природной подсистемы находятся между собой в отношениях, предопределенных в основном естественными условиями. На отдельных участках отношения изменены в следствии искусственного вмешательства.

Различные горные породы находятся между собой в отношениях совместного залегания и связаны контактом литологических границ. В пределах одной литологической разности отдельные небольшие части грунтового массива, как мы условились, именуемые «образцами грунта», находятся между собой в отношениях статического сонахождения и связаны одинаковыми условиями образования и основной границей контакта различных частей – некоторого условного объема грунта, которая обусловлена массой и формой отбираемых образцов (предельных элементов геологической среды ПТЭС).

При этом, необходимо подчеркнуть, что при изучении ПТЭС, исследователь приходит уже к новому представлению структуры геологических тел (традиционно в геологии основными структурными элементами являются геологические слои (пласты)). Новый подход уже нашел свое применение в математической геологии: «при использовании статистической модели геологические объекты рассматриваются как совокупности бесконечно большого количества элементарных участков, каждый из которых соответствует по размеру элементарной пробе или месту единичного замера изучаемого свойства» [22]. Такой подход вполне правомерен, поскольку размеры проб или сечения искусственных обнажений – скважин и горных выработок – обычно неизмеримо малы по сравнению с изучаемыми геологическими объектами. Данный подход обусловлен принципами математического моделирования; мы же рассматриваем его с позиций системного исследования непрерывных в пространстве объектов. Выводы о необходимости нового подхода к членению протяженных геологических и гидрогеологических тел и в том, и в другом случае очевидны и тождественны.

Таким образом, строение грунтовой толщи можно представить как множество элементарных частей (объемов) этой толщи, представленных в данной системе понятием «образец грунта». Любой элементарный объем грунтовой толщи всегда может быть опробован (наблюдаться), то есть потенциально входит в систему. Однако в силу специфики объекта (характер нахождения и большие размеры), наблюдениям подвергается (входит в систему) лишь крайне ограниченное количество элементарных частей геологической толщи. Эти части и являются «пробами» или «образцами». Другие «части» являются потенциальными «образцами» и в случае необходимости всегда могут войти в систему, что отвечает требованиям соблюдения полноты ее модели (принцип полноты).

Точно таким же образом можно представить и строение подземных вод, которые являясь единым

телом (в отличие от горных пород) никогда в гидрогеологии самостоятельно не делились на части – разделение происходило посредством отнесения вод к различным водоносным горизонтам (водонасыщенным горным породам). В новом же виде, при системном представлении, подземные воды какого-либо горизонта можно представить как множество элементарных частей (объемов) вод данного горизонта, представленных в данной системе понятием «проба воды» (рис.2). В этом случае, как и в случае с геологической толщей, наблюдениям подвергаются лишь отдельные объемы, которые также являются представителями элементарного уровня в исследуемой ПТЭС.

На сегодняшний день в законы композиции (предопределенные техническим проектом), обеспечивающие нормальные условия работы инженерного сооружения и грунтового массива должны вноситься специальные коррективы, связанные с появлением второй (главной с экологической точки зрения) цели изучения ПТЭС – минимизации негативных последствий (выхода системы из равновесия). В качестве примера можно привести необходимость ограничения количества сточных вод и концентраций в них загрязняющих веществ, поступающих на поля фильтрации (возникновение проблемы загрязнения подземных вод и подтопления промышленной площадки предприятия). В связи с этим, изменяются требования к характеру и режиму эксплуатации инженерных сооружений. Таким образом, законы композиции данной системы обеспечивают условия ее оптимального функционирования и определяются технологией и режимом эксплуатации ее элементов, которые корректируются при нарушении состояния системы.

Вопрос об устойчивости системы, о ее равновесном (гомеостатическом) состоянии является самостоятельным и непростым. Не всегда бывает ясно как выделить гомеостатические границы системы, какими критериями руководствоваться при принятии управленческих решений. Чаще всего используются нормативы предельных значений по СНИПам, ГОСТам, СанПиНу и другим регламентирующим эти показатели документам. На некоторые показатели (глубина залегания подземных вод) жестких нормативов не существует. И в тех и в других случаях не рекомендуется руководствоваться только этими нормативами, так как они не всегда отвечают поставленной цели. Да и некоторые показатели гос-тируемых компонентов, например – предельно допустимые концентрации химических веществ в подземных водах (по железу, марганцу), подвергаются критике в силу их определенной условности.

В моделировании систем, при решении задач о выходе системы из равновесия предлагается использовать так называемые прагматические модели, то есть те модели, под которые подстраивают реальность [2]. Другими словами, прагматические модели являются моделями нормального (равновесного) функционирования исследуемых систем, своего

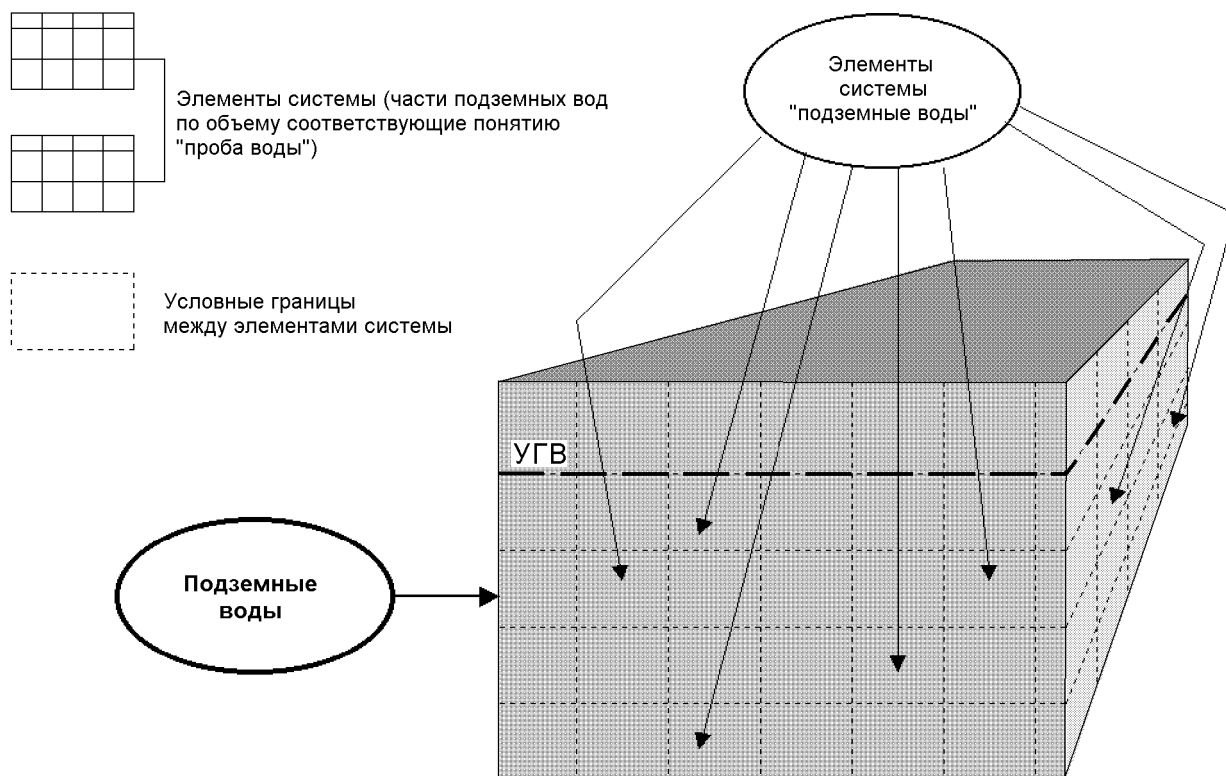


Рис.2. Структура подсистемы «подземные воды» в ПТЭС.

рода эталоном для сравнения и оценки степени выхода системы из состояния гомеостаза. На наш взгляд, без подобного рода моделей исследователю ПТЭС также не обойтись. При этом, предлагается использовать лишь иной, более удобный и отвечающий смыслу исследования термин для названия данной модели. Вероятно, таким термином должен являться термин «модель устойчивости системы».

Таким образом, для модели устойчивости системы необходимы критерии (границы), по которым можно будет судить о ее гомеостазе. Можно использовать две модели: традиционную (непосредственно по регламентирующим показателям состояния объектов) и предлагаемую нами «экспертную модель устойчивости». Экспертная модель опирается на оценку не всех природных объектов, потерявших устойчивость по ГОСТу, 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, каналов, 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, определяемых математическим прогнозом, угрожают в ближайшем будущем выходу из равновесия (загрязнению, подтоплению, деформациям) защищаемых объектов. Другими словами, экспертная модель устойчивости системы подразумевает наличие **двухярусной** границы гомеостаза: гра-

ничных параметров для защищаемых объектов и граничных параметров для объектов смежных с ними.

Принципы первоочередного выделения защищаемых объектов и двухярусности границ гомеостаза должны стать обязательными при определении модели устойчивости ПТЭС, которая, в свою очередь, вносит корректировку в методику организации и ведения мониторинга ПТЭС.

Таковы общие методические особенности и приемы моделирования сложных природно-технических объектов исследования. Применение системного анализа в рамках предложенной методики позволяет полнее и глубже представить исследуемый объект, его функционирование и развитие, а в конечном счете - оптимизировать мониторинг природно-технических экосистем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дементьев Л.Ф. Выделение систем в геологическом пространстве // Системный подход в геологии. -М., 1989. -С.26-33.
2. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. -М., 1989, -367 с.
3. Смирнов Б.И. Конструирование геологических систем и классифицирование // Системный подход в геологии. -М., 1989. -С.49-54.
4. Павлов А.Н. Основы системного подхода в геологии. -Л., 1981. -84 с.
5. Геоэкологические подходы к проектированию природно-технических геосистем. -М., 1985. -235 с.
6. Урманцев Ю.А. Общая теория систем // Системный подход в геологии. -М., 1989. -С.7-26.

7. Епишин В.К., Трофимов В.Т. Геологическая среда и инженерные сооружения - сложная природно-техническая система // Теоретические основы инженерной геологии. Социально-экономические аспекты. -М., 1985. -С.32-45.
8. Бондарик Г.К. Социально-экологические проблемы и инженерная геология // Геоэкология. -1993. -№4. -С.27-31.
9. Бочаров В.Л., Зинюков Ю.М., Смоляницкий Л.А. Мониторинг природно-технических экосистем. – Воронеж, 2000. –226 с.
10. Бондарик Г.К., Ярг Л.А. Природно-технические системы и их мониторинг // Инженерная геология. -1990. -№5. -С.3-9.
11. Четвериков Л.И. Теоретические основы разведки недр. -М., 1984. -156 с.
12. Четвериков Л.И. Проблема достоверности познания в геологии // Сов. геология. -1991. -№5. -С.70-77.
13. Зеегофер Ю.О., Тютюнова Ф.И. Техногенные подсистемы гидrolитосферы. Проблемы управления. -М., 1990. -128 с.
14. Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии. -М., 1981. -256 с.
15. Методические рекомендации по проведению наблюдений за режимом подземных вод по ведомственной сети скважин. -Днепропетровск, 1986. -46 с.
16. Методические рекомендации по гидрогеологическим исследованиям и прогнозам для контроля за охраной подземных вод. Сост. В.М. Гольдберг. -М., 1980. -46 с.
17. Методические рекомендации по оценке и прогнозу многолетнего режима уровня первых от поверхности водоносных горизонтов. -Днепропетровск, 1985. -48 с.
18. Питьева К.Е. Гидрогеохимия. -М., 1978. -327 с.
19. Бондарик Г.К. Методика инженерно-геологических исследований. -М., 1986. -333 с.
20. Блауберг И.В., Юдин Э.Г. Становление и сущность системного подхода. -М., 1973. -180 с.
21. Бондарик Г.К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. -М., 1971. -271 с.
22. Каждан А.Б., Гуськов О.И. Математические методы в геологии. -М., 1990. -251 с.