



**Аликин Э.А.**  
 доцент, к.г.-н.н., Пермский  
 государственный национальный  
 исследовательский университет  
 alikin.inggidrogeo@mail.ru

# ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ (ГТК)

*Изложена концепция организации месторождений полезных ископаемых (МПИ) как ГТК, их структурирование и функционирование. Приводятся факторы негативного воздействия разработки МПИ на недра с формированием гибридного режима геологической среды.*

*Реализация цели достигается решением обратной задачи управления ГТК и системным моделированием, обеспечивающих безаварийную разработку МПИ.*

*Предлагается смена парадигмы технологии разработки колчеданных МПИ тяжелых металлов, калийно-магниевого и натриевого солей с шахтно-рудничной на скважинную*

**Ключевые слова:** эксплуатация и ликвидация ГТК, технологические параметры, мониторинг геологической среды, сопоставительный анализ

ГТК – объект, представляющий собой участок инженерного воздействия на недра с преобразованием их в геологическую среду. Поэтому, определенно организованная совокупность элементов природного и технического происхождения, связанных и взаимодействующих между собой и с внешней средой, образует единое целое – сложную систему. Для того чтобы обеспечить функционирование ГТК нужно применить или изменить геологическую подсистему, то есть так организовать «естественное», что-

бы получить наперед заданные характеристики «искусственного» (безаварийную эксплуатацию ГТК с учетом природоохранных ограничений).

С позиций системного подхода структура такого участка складывается из элементов геологического, техногенного и интеллектуального происхождения, которые объединены специфическим образом (Аликин Э.А., 2019).

Спектр инженерного воздействия на недра весьма широк: фундаменты капитальных зданий и сооружений, подземный транспорт (метро, тон-



нели), трубопроводный транспорт, гидротехнические объекты (плотины), разработка полезных ископаемых (ПИ), эксплуатация полигонов захоронения вредных жидких отходов (ВЖО) и др. Поэтому представляется целесообразным ограничиться в данной статье проблемой оптимизации добычи полезных ископаемых и эксплуатацией полигонов захоронения ВЖО. Такой выбор является приоритетным, поскольку добыча ПИ и объемы ВЖО неуклонно растут, следовательно, увеличиваются эксплуатационные затраты. Поэтому, оптимизация управления эксплуатацией ГТК этого типа позволит получить наиболее ощутимый экономический эффект.

По типу добычи полезных ископаемых ГТК могут классифицироваться следующим образом: карьерно-разрезный (открытый), шахтно-рудничный (подземный), дражный (открыто-подводный), скважинный (традиционный и геотехнологический). Каждый из них имеет свою специфику воздействия на недра (подземные воды и горные породы) и поверхностные воды.

Основную роль в нарушении естественного режима недр играют факторы физического и химического воздействия. Физические факторы влияют на естественную напряженность массива горных пород путем нарушения вертикального и бокового напряжения горных пород. Химическое воздействие проявляется в изменении химического (макро и микрокомпонентного) состава подземных вод и пород зоны аэрации. По генетическому принципу факторы, формирующие гибридный режим подземных вод, подразделяются на природные и техногенные. Природные факторы делятся на:

- режимформирующие (гидрометеорологические, экзогенные, эндогенные, биогенные и космические);
- режимобразующие (геологическое строение, рельеф и его растительность, геоморфологические, почвенные), которые в течение наблюдений не изменяются, но определяют условия, в которых проявляются воздействие режимформирующих факторов на подземные воды.

Техногенные факторы наиболее разнообразны и масштаб их воздействия на подземные воды неизмеримо выше, чем природных. Ими являются:

- эксплуатационный водоотбор, шахтный и карьерный водоотлив формируют воронки депрессии естественного уровня подземных вод, вызывающие изменение направления их движения; формирования техногенной зоны аэрации горных пород; шахтные и рудничные воды представляют собой техногенные рассолы, которые благодаря окислению сульфидных материалов характеризуются РН – 3-4, содержанием тяжелых металлов в десятки раз превышающих ПДК;

- эксплуатация нефтяных и газовых месторождений на 3-4 стадиях их разработки сопровождается совместным извлечением из эксплуатационных скважин газа, нефти и рассолов, что приводит к необходимости захоронения нефтепромысловых сточных вод, формируя зоны повышенного давления в пластах-коллекторах и провоцируя, перетоки рассолов в вышележающие водоносные горизонты с пресными подземными водами;

- шахтно-рудничная добыча ПИ сопровождается накоплением горной массы в виде терриконов и солеотвалов, представляющих реальную угрозу загрязнения пресных подземных вод посредством растворения атмосферными осадками выщелачиваемых солей и сульфидных минералов из горной массы и их фильтрацией в водоносные горизонты;

- карьерная и дражная добыча ПИ сопровождаются формированием карьеров глубиной от десятков до сотни метров с обвалами и оползанием стенок карьеров, нарушением режима грунтовых вод; дражные полигоны изменяют морфологию русла и поймы рек, загрязняя поверхностные воды, и отрицательно влияют на биосферу.

Факторы, вызывающие изменение естественного состояния горных пород по генетическому принципу также подразделяется на природные и техногенные. К природным относятся: экзогенные (боковая эрозия рек), карст, оползни, сели и эндогенные факторы (землетрясения, новейшие тектонические движения). Одним из важнейших факторов воздействия на породные массивы являются техногенные факторы. При карьерном способе разработки МПИ стенки карьеров ввиду нарушения естественного давления (бокового) принимают углы естественного откоса слагающих их пород. При шахтном способе, благодаря выработке ПИ образуются горные выработки, над которыми массив горных пород претерпевает разуплотнение. Крепеж горных выработок или оставление целиков горных пород (соляные рудники) бывает недостаточным компенсатором, что приводит к куполению кровли, горным ударам и даже затоплению соляных рудников.

**Таким образом, функционирование ГТК формирует в пределах гидродинамического воздействия гибридный режим геологической среды, закономерности существования которого кардинально усложняются по сравнению с естественным режимом недр.**

Изучение формирования сложной системы (ГТК) на начальном этапе геологоразведочных работ (поисковый этап) имеет целью познавательный подход к естественному состоянию геологической подсистемы, имеющей форму природно-естественной целесообразности, в последующем цель – знание о той большой системе, которая

возникает при вовлечении МПИ в эксплуатацию. Согласно закону «Принципа блокировки» о любом уровне иерархической организации системы можно знать столько, насколько позволяют знания о двух соседних уровнях – более низкого и более высокого. Поэтому на стадии разведки и проектирования разработки МПИ для повышения знания о системе на более высоком уровне иерархии (эксплуатации ГТК), необходимо составление модели разрабатываемого месторождения с обоснованием основных технологических параметров, обеспечивающих безаварийную его эксплуатацию. Разработка моделей ГТК как сложных систем, базируется на системном подходе, основными принципами которого в данной постановке являются (Аликин Э.А., 2009):

- использование пяти универсальных подходов («большой пятерки») применительно к ГТК: таксономии (пространственное положение в недрах и степень предшествующей изученности), внутреннее строение (форма, состав и свойства его подсистем и элементов), внешних связей с сопредельными системами (соседними участками недр, атмосферой, поверхностной гидросферой), внутреннего функционирования, обеспечивающего условия безаварийной эксплуатации ГТК, технологические параметры разработки, достоверность которых адекватна степени изученности ГТК, генезиса (способа разработки);

- иерархичность ГТК: от МПИ в естественных условиях до его ликвидации после эксплуатации включительно;

- эмерджентным свойством ГТК как системы является формирование эксплуатационных (извлекаемых) запасов различных полезных ископаемых. Использование системного моделирования позволяет создать взаимосвязанную, иерархически организованную совокупность частных моделей ГТК. Ядром системы моделирования является базовая концепция ГТК, включающая изучение во взаимосвязи трех компонент: геологической, технической и управленческой (Аликин Э.А., 2016).

**Таким образом, процесс формирования этих моделей на основе выявленных взаимосвязей является по существу процессом управления, цель которого – последовательный перевод изучаемого ГТК из естественного состояния в состояние безаварийной эксплуатации и рациональной ликвидации с учетом природоохранных ограничений.**

Обеспечение природоохранных ограничений требует появления в отношениях между человеком, техникой и ГС еще одного звена – обратной связи, которая устанавливает зависимость не только техники от природы (способ обработки МПИ), но и природы от техники (тех-

нология добычи ПИ). В существовании данной взаимосвязи заключается сущность мониторинга эксплуатации ГТК как процесса управления. При его проведении между технической подсистемой ГТК и ГС, фиксируются связи, формирующиеся под влиянием технологических параметров разработки МПИ.

С учетом вышеизложенного, необходимо разработать комплекс задач и алгоритм их решения, позволяющих реализовать поставленную цель – оптимизировать управление процессом эксплуатации МПИ как системы ГТК. Представляется целесообразным рассмотреть следующие задачи:

- технологические;
- экологические;
- экономические.

В зависимости от специфики цели следует различать прямые и обратные задачи управления достижением цели. В прямой задаче требуется по заданному управлению описать прогнозное поведение системы ГТК по данным мониторинга. В обратной задаче необходимо найти алгоритм управления, обеспечивающего заданное поведение системы или заданные свойства её поведения – сохранения численных значений параметров эксплуатации ГТК, не превышающих их критическую (пороговую) величину. Первая цель реализуется выявлением взаимосвязи настоящего с будущим, то есть от того, что и как мы делаем сейчас зависит то, что ждет нас в будущем. Вторая цель выражается выявлением взаимосвязи будущего с настоящим, то есть от того, какие цели мы ставим на будущее, зависит направление наших действий сейчас.

**Из вышеизложенного следует, что для достижения цели (безаварийной эксплуатации) необходимо решить обратную задачу управления функционированием ГТК. Важнейшим фактором является обоснование системообразующих технологических параметров и их численных пороговых значений, соблюдение которых обеспечивает безаварийную эксплуатацию МПИ. Решение этой задачи является базисным фактором рентабельности разработки МПИ, поскольку позволяет разработать технологический режим функционирования ГТК. Он обеспечивает формирование гибридного режима как ГС, так и техногенного воздействия на соседние системы: поверхностные воды, атмосферу и почвы с учетом природоохранных ограничений.**

При этом в процессе мониторинга функционирования ГТК, ведутся систематические наблюдения не за всеми технологическими параметрами, а только за теми, которые в процессе разработки МПИ могут приблизиться к их пороговому значению, увеличивая вероятность возникнове-

ния аварийных ситуаций или нарушения природоохранных ограничений. Так, опыт эксплуатации месторождений подземных вод позволил установить 2 категории технологических параметров:

1) балансовая –  $S_f \leq S_{доп.}$ , где  $S_f$  и  $S_{доп.}$  – фактические и допустимые понижения уровня подземных вод в эксплуатационных скважинах;

2) качественная – фактическое содержание нормируемых компонентов в извлекаемых подземных водах (ПВ) не должно превышать пороговых значений, в частности, для питьевых ПВ согласно СанПиН 2.1.4-1074-01.

При эксплуатации полигонов захоронения вредных жидких отходов установлены 2 категории технологических параметров:

- балансовая –  $\Delta S_f \leq \Delta S_{доп.}$ , где  $\Delta S_f$  – дополнительное повышение давления в кровле пласта-коллектора (ПК), обусловленное закачкой в него ВЖО;  $\Delta S_{доп.}$  – допустимое повышение давления на подошву регионального водоупора в кровле ПК, обеспечивающего невозможность его гидроразрыва;

- качественная – совместимость ВЖО с водовмещающими породами и пластовыми рассолами ПК, достигаемая в процессе их водоподготовки для обеспечения стабильной приемистости эксплуатационных скважин. (Аликин Э.А., 2016).

При выявлении в процессе мониторинга эксплуатации МПИ тенденций к приближению численных значений параметров к их пороговым значениям, разрабатываются и реализуются превентивные технологические мероприятия по их стабилизации.

Разработка МПИ оказывает, как правило, негативное геоэкологическое воздействие не только на недра, но и на смежные системы: поверхностные воды, атмосферу, почвы. Это геоэкологическое воздействие в конечном итоге определяет качество жизни человеческой цивилизации и темпы её развития. Поэтому необходимо на стадии проектирования разработки МПИ предвидеть последствия функционирования ГТК. Для этого целесообразно выделить и рассмотреть формирование своеобразного процесса гистерезиса («возвращения») системы ГТК и зоны его воздействия на начальный (естественный) режим существования (постэксплуатационный этап). Этот этап характеризуется:

- прекращением шахтного или карьерного водоотлива, является причиной изменения гидродинамического равновесия и окислительно-восстановительных условий, формируя развитие специфических гидрогеохимических процессов;

- разрушением крепежа подземных горных выработок, нарушающим целостность подрабатываемых участков с формированием трещин, полостей, обвалов кровли;

- подземные воды, затопляя горные выработки и искусственную зону аэрации (воронку депрессии) рудоносных пород, растворяют вскрываемые обрушением пород рудные минералы и формируют нестационарный гидрохимический режим, то есть резкий рост содержания всех компонентов в течение 4-6 месяцев после выхода пластовых вод на поверхность (в 5-6 раз по сравнению с периодом разработки МПИ), сохранение повышенных значений в течение 3-5 лет (Рыбникова Л.С., 2019);

- в соляных рудниках разрушаются податливые охранные целики в горных выработках, смыкаются их кровли и подошвы, приводящие к разуплотнению водозащитной толщи (ВЗТ) и уплотнению надсолевых пород с формированием на поверхности земли мульды оседания с амплитудой 8-10 м. Они провоцируют кливаж прослоев мергелей в каменной соли (ВЗТ) на участках наибольшего угла изгиба формы мульды, и в конечном итоге потери основной функции данной толщи;

- обогащенные солями тяжелых металлов шахтные и рудничные воды разгружаются в речную сеть, загрязняя поверхностные воды.

Выбор метода прогноза воздействия техногенных факторов на ГС зависит от сложности геолого-гидрогеологических условий МПИ и зоны его гидродинамического воздействия, степенью их изученности, типом решаемых задач. Чем полнее изучен объект и менее сложен, тем достовернее он может быть описан детерминированной моделью, так как неопределенность в знании изменений его свойств будет минимальной. Наоборот, чем сложнее объект и менее изучен, тем больше неопределенности в знании закономерностей изменения его свойств и для их характеристики может быть использована модель случайной величины. При функциональной связи одна переменная ( $x_i$ ) является однозначно функцией другой ( $y_i$ ). При вероятностной или стохастической зависимости, изменение одной ведет к изменению закона распределения другой. Из вероятностных связей используется корреляционная, при которой одна реагирует на изменение другой изменением своего математического ожидания ( $m_{x/y}$ ) или дисперсии ( $\sigma_{2x/y}$ ). Методы, использующие связи такого типа называют корреляционным анализом. Линией регрессии называется график функции [ $m_{x/y}=f(y)$ ], представляющий собой геометрическое место точек, соответствующих значениям условного математического ожидания ( $m_{x/y}$ ). Уравнение, описывающее эту зависимость, называют уравнением регрессии. Точки на графике располагаются в виде эллипсовидного облака, если группируются около прямой или кривой линии, то связь существует и близка к функциональной.

Поскольку ГТК (МПИ) является сложной, иерархически организованной системой, то первоочередной задачей является системное моделирование процесса эксплуатации МПИ как технологического процесса. При этом особое внимание обращается на взаимодействие составляющих его элементов (геологических, технических, управленческих). С этой целью рекомендуется использование известного с конца XX века метода «черного ящика» (рис.1).

Если рассматривать эксплуатацию ГТК как систему (технологический процесс), то её внешние связи можно представить схемой: буквами  $H, X, Z$  обозначается совокупность частных факторов –  $h_i, x_i, z_i$  на систему, которые называются входами системы или факторами, буквой « $Y$ » обозначается совокупность частных выходов  $y_i$  (уровень добычи ПИ, размеры воронки депрессии или репрессии (при захоронении ВЖО) и т.д.), в конечном счете – себестоимость добычи ПИ. Различие между факторами  $H, X, Z$  состоит в следующем: факторы  $H$  и  $X$  – это контролируемые входы, т.е. воздействия, которые могут быть измерены, при этом  $H$  – факторы контролируемые, но не регулируемые (их можно измерить, но не изменить – мощность рудного тела, водоносного горизонта;  $X$  – факторы, контролируемые и регулируемые, позволяющие осуществлять управление функционированием системы (уровень добычи ПИ, величина шахтно-рудничного или карьерного водоотлива);  $Z$  – это вектор не контролируемых факторов, т.е. воздействий на систему, которые находятся вне нашего контроля и измерения. Не контролируемые факторы можно подразделить на три группы в соответствии с причинами, по которым их контроль невозможен: слабая изученность, не позволяющая обосновать плановую схематизацию МПВ 3-ей и 4-ой групп сложности, неумение контролировать тот или иной фактор (фильтрационные свойства разделяющего водоупора, физическая невозможность проконтролировать источники формирования привлекаемых ресурсов в МПВ 3-ей и 4-ой групп сложности).

**Контролируемые факторы  $H$  и  $X$  должны характеризовать (обосновывать) частные модели ГТК и зависимость выходов системы « $Y$ » (численных значений факторов, контролирующих безаварийную эксплуатацию ГТК от этих факторов). Модели не контролируемых факторов должны позволить учет их влияния хотя бы на качественном уровне.**

Формирование постэксплуатационного периода разработки МПИ, характеризуемого ростом ряда геоэкологических проблем, напрямую не влияет на рентабельность эксплуатации ГТК, но требует весьма существенных средств для

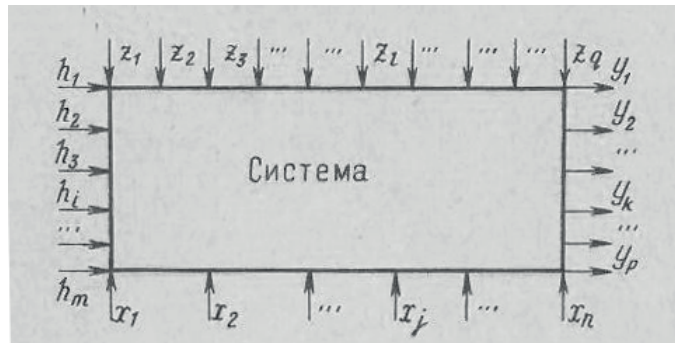


Рис. 1.

Схема внешних связей системы

ликвидации его последствий. С целью резкого снижения этих затрат предлагается:

- для постэксплуатационного периода эксплуатации угольных и колчеданных МПИ разработать и реализовать промышленную технологию извлечения из шахтных и рудничных вод тяжелых металлов, повысив в целом рентабельность их разработки и резко снизив степень загрязнения поверхностных вод;

- в соляных рудниках интенсифицировать закладку выработанного подземного пространства подземных горных выработок с первоочередной на участках формирования мульд оседания земной поверхности по оперативным результатам мониторинга эксплуатации (профилей нивелирования). Это мероприятие, безусловно, понизит рентабельность эксплуатации ГТК, но резко снизит как риск затопления рудника, так и аварийность коммуникаций (подземных трубопроводных сетей) и фундаментов капитальных зданий; уменьшит объем терриконов, интенсивность и площадь засоления грунтовых вод, формирующихся при растворении атмосферными осадками солей в терриконах.

**Эффективность управления процессом функционирования ГТК зависит не только от достоверности решения прогнозных задач, но и от методов достижения безаварийной эксплуатации и ликвидации ГТК как системы. При такой постановке вопроса на первый план выдвигается мониторинг геологической среды (МГС) – как основной методологический приём, обеспечивающий требуемую эффективность управления ГТК.**

Его организация (виды наблюдательной сети и её размещение, регламент наблюдений и опробования) должна обеспечить получение достоверной информации о реакции геологической компоненты ГТК, на техногенное воздействие. Поскольку временные рамки МГС синхронизированы с процессом эксплуатации и ликвидации ГТК, то анализ наблюдений позволяет выявлять тренды численных значений параметров геологической среды на технологические параметры



процесса функционирования ГТК и заблаговременно принимать управленческие решения по корректировке технологии эксплуатации и ликвидации ГТК. Таким образом, сопоставительный анализ фактических результатов МГС с расчетными пороговыми их значениями позволяет своевременно реализовать корректировку технологии разработки и ликвидации МПИ как системы, обеспечивающую эффективность управления этими процессами.

Изложенные принципы управления эксплуатацией ГТК недостаточно эффективны для шахтно-рудничной добычи руд тяжелых металлов, каменного угля, калийно-магниевых и натриевых солей. Это связано с тем, что суммарный их негатив на среду обитания человеческого общества несоизмеримо выше эффекта внедрения принципов оптимизации управления ГТК. По существу, это рудименты индустриального общества. Поэтому переход в постиндустриальное, а тем более в цифровое общество невозможен без технологической парадигмы разработки этих месторождений. По моему оценочному суждению на смену шахтно-рудничной технологии разработки колчеданных месторождений тяжелых металлов, калийно-магниевых и натриевых солей должна прийти скважинная их добыча. Она основана на внедрении в рудные слои через нагнетательные скважины технологических растворов, способных

выщелачивать молекулы тяжелых металлов, солей, серы. Далее по эксплуатационным скважинам обогащенные рудоносные рассолы поднимаются на поверхность земли, концентрируются и формируются в товарные формы.

В России уже имеется положительный опыт скважинной технологии добычи золота, урана, в Украине – серы. Поэтому форсированные НИ-ОКР по разработке скважинной технологии добычи солей и тяжелых металлов представляются приоритетными для кардинальной перестройки технологии добычи минерального сырья.

**Вывод:** Разрабатываемые МПИ в настоящее время находятся на разных уровнях организации и технологии добычи минерального сырья:

- для месторождений подземных вод и эксплуатации полигонов захоронения ВЖО, а возможно и нефти, имеются численные значения технологических параметров, обеспечивающих при их соблюдении безаварийную эксплуатацию;
- для месторождений твердых ПИ технологические параметры могут быть обоснованы по предлагаемой методике;
- архаичная шахтно-рудничная технология разработки колчеданных месторождений тяжелых металлов, калийно-магниевых и натриевых солей нуждается в смене парадигмы на скважинную технологию. ❧

### Литература

1. Аликин Э.А. Методология изучения месторождений подземных вод на основе системного подхода (Автореферат диссертации кандидата г.-м.н., Пермь, 2009).
2. Аликин Э.А. Концепция геологического изучения участков недр для захоронения в них вредных жидких отходов (ВЖО) //Разведка и охрана недр/№ 5, 2016, с.62-64.
3. Аликин Э.А. Мониторинг геологической среды – вчера, сегодня, завтра //Разведка и охрана недр/№ 12, 2019, с.37-41.
4. Рыбникова Л.С. Процессы формирования подземных вод в горнодобывающих районах Среднего Урала на постэксплуатационном этапе (Автореферат диссертации доктора г.-м.н., Москва, 2019).

UDC 504

**E. A. Alikin**, Associate Professor, PhD , Perm State National Research University, alikin.inggidrogeo@mail.ru

## PRINCIPLES OF OPERATIONAL CONTROL OPTIMIZATION OF GEOTECHNICAL SYSTEMS

**Abstract.** The concept of organization of mineral deposits (MD) as geological and technical complexes (GTC), their structuring and functioning is presented. The factors of the negative impact of the development of mineral deposits on the subsoil with the formation of a hybrid regime of the geological environment are given.

The implementation of the goal is achieved by solving the inverse problem of GTC management and system modeling to ensure accident-free development of mineral resources.

It is proposed to change the paradigm of technology for the development of metalliferous mines, heavy metals, potassium-magnesium salts from mine-ore to borehole

**Key words:** Operation and liquidation of geological and technical complexes, technological parameters, geological environment monitoring, comparative analysis.