

## Мониторинг подземных хранилищ газа

УДК 622.691.4:681.3

### К МЕТОДИКЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОБЪЕКТАХ ПОДЗЕМНОГО ХРАНЕНИЯ ГАЗА В ГРАНУЛЯРНЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

© Ц.Д. Сорохан<sup>1</sup>, А.В. Кудельский<sup>2</sup>, В.И. Сухачев<sup>1</sup>, А.А. Руденок<sup>2</sup>, О.Н. Криштопа<sup>2</sup>

1) ОАО «Белтрансгаз»,

2) Институт геологических наук НАН Беларуси

Будівництво та експлуатація ПСГ посилюють техногенний вплив на оточуюче середовище, що викликає необхідність проведення геоecологічного моніторингу роботи таких об'єктів. У статті наводяться мета, засоби та способи проведення геоecологічного моніторингу, а також шляхи використання їх результатів.

UGSF creation and operation result in man-caused influence on the environment that arouses a necessity of geoecological monitoring of such objects work. Aims, means and ways of conducting geoecological monitoring and its results utilisation are given in the article.

Учеными и специалистами Института геологических наук НАН Беларуси и ОАО «Белтрансгаз» разработан отраслевой Руководящий документ «Геоэкологический мониторинг на объектах подземного хранения газа в Республике Беларусь» (2003).

#### 1. Геоэкологические дестабилизации в районах размещения подземных хранилищ газа

Несмотря на то, что газ является наиболее чистым из всех известных в настоящее время типов энергетического сырья, его потери на стадии добычи, подготовки и транспортировки по системам магистральных трубопроводов, а также в технологиях подземного хранения газа (ПХГ) создают достаточно серьезные экологические проблемы. В некоторых случаях это приводит к серьезному загрязнению атмосферы, почвенного покрова, поверхностных и подземных вод. В качестве примера загрязняющего воздействия на подземные воды «газового дыхания» ПХГ можно привести сероводородное заражение вышележающих (над газовым хранилищем) подземных вод в разрезе Осиповичского ПХГ (Республика Беларусь). Процессы глубокого изменения химического состава подземных вод и, в том числе, процессы микробиальной сульфатредукции являются геохимически неизбежными для ПХГ, что следует иметь в виду как при их проектировании, так в последующем, при разработке мероприятий по уменьшению экологических дестабилизаций вследствие промышленной эксплуатации ПХГ.

Закачка углеводородных газов (преимущественно  $\text{CH}_4$ ) в глубоко залегающие водоносные горизонты (пласты-коллекторы), как и всякое другое техногенное явление, оказывает вполне определенное и существенное воздействие на окружающую природную среду. Многочисленные и разнообразные физико-химические процессы, вызываемые подобным воздействием, активно проявляются уже при строительстве объектов подземного хранения газа, прослеживаются при их циклической эксплуатации и оказывают серьезное дестабилизирующее влияние на природные комплексы в случае аварийных ситуаций.

В числе важнейших экологических дестабилизаций можно назвать:

- 1) Сверхгидростатические воздействия на пластовые гидродинамические системы, что реализуется повышением напоров и уровней подземных вод во всех вышележащих водоносных комплексах, переливами воды в отдельных скважинах в период закачки газа и пр. Явления эти в значительной мере обратимы и уже в период отбора газа наблюдается релаксация гидродинамических пластовых систем хранилища;

- 2) Возможный конвективно-диффузионный массоперенос  $\text{CH}_4$  различной плотности в направлении земной поверхности по тектонически ослабленным зонам геологической структуры подземного хранилища газа с последующим:
  - загрязнением подземных вод метаном и, в случае сульфатсодержащих вод, – сероводородом вплоть до зоны активного водообмена и горизонтов питьевых вод;
  - накоплением  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  (реже  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}$ ) в поровом пространстве зоны аэрации и, в том числе, на уровне подвальных помещений зданий промышленного и жилого фондов.
- 3) Геотехнологические аварии и катастрофы, связанные с выбросами газа и подземных вод.

## 2. Геоэкологический мониторинг

Вопросы организации и проведения комплексного мониторинга за состоянием природных комплексов и, в том числе, геологической среды являются важнейшими при создании и эксплуатации подземных газовых хранилищ. Информация, получаемая в процессе мониторинга, должна учитываться соответствующей базой данных и отражать экологическое состояние природных комплексов на разных стадиях освоения и эксплуатации объекта с целью уменьшения негативных процессов методом оптимизации технологических процессов и систем.

Для комплексного мониторинга должна быть создана сеть (Рисунок 1) контрольных (контроль состояния пласта коллектора и искусственной залежи газа) и наблюдательных скважин различного назначения (геофизические, пьезометрические и др.) и местоположения относительно элементов геологической структуры подземного хранилища газа (водоносные горизонты, дизъюнктивные и пликвативные нарушения и пр.).

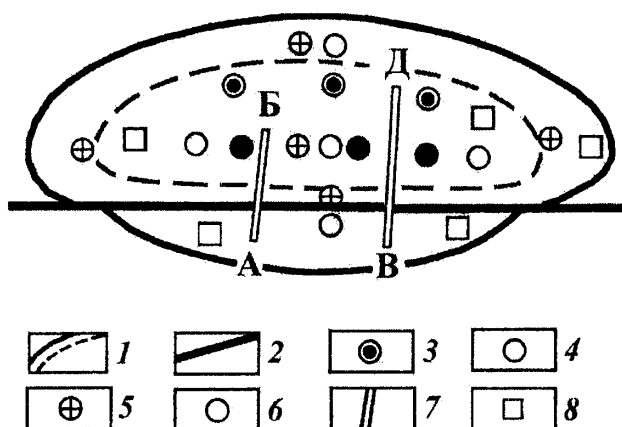


Рисунок 1 – Принципиальная схема структуры наблюдений за экологическим состоянием подземного хранилища газа с элементами технологической сети контроля и наблюдений

1 – контуры геологической структуры и положения газо-водяного контакта (пунктир) при максимальной репрессии на пласт-коллектор; 2 – тектоническое нарушение. Скважины: 3 – нагнетательные; 4 – эксплуатационные и, возможно, двойного назначения (закачка – отбор газа); 5 – наблюдательные многоцелевые и контрольные (гидрогеологические на все водоносные горизонты, геофизические, скважины для контроля положения газо-водяного контакта и др.); 6 – наблюдательные для контроля зоны активного водообмена с горизонтами хозяйственно-питьевых вод, в т.ч. эксплуатационные на воду скважины. Прочие обозначения: 7 – зоны (профили А–Б, В–Д и др.) опробования газовых композиций почвенного покрова и ниже залегающих почво-грунтов; 8 – надворные колодцы, родники и другие водопункты (озера, реки, болота)

### 2.1 Геоэкологический мониторинг как составная часть технологической системы контроля и наблюдений

Производственно-технологический и экологический риски при эксплуатации подземных хранилищ газа являются взаимосвязанными и взаимообусловленными, что объясняется единством основного объекта, территорий приложения технологий и проявления экологических последствий функционирования последних. Этим важным обстоятельством определяется единство и практически полная функциональная пригодность технологических систем контроля и наблюдений для оценки экологического состояния хранилищ, хотя во втором случае несколько расширяется список объектов наблюдений, изменяются цели и задачи, а также целевая направленность интерпретации результатов мониторинга.

2.1.1. В системе *технологического контроля* и наблюдений основным объектом постоянного мониторинга является геологическая среда, в пределах которой осуществляется контроль целостности газонасыщенного пласта-коллектора и сопряженных с ним покровных, прослеживаются гидро- и газодинамические процессы формирования газонасыщенного пространства, подвижные границы газо-водяных контактов, а также возможные утечки (перетоки) воды и газа за пределы пласта-коллектора. Важнейшей задачей постоянного технологического мониторинга является обеспечение экономической рентабельности и промышленной безопасности подземного хранилища газа (открытое фонтанирование по заколонному пространству скважин, взрыво- и пожароопасность, просадочные явления и наведенная сейсмичность и пр.) с сопутствующими выявлениями и минимизацией возможных экологических дестабилизаций в районе расположения объекта.

2.1.2. Важнейшая цель и задачи *геоэкологического мониторинга* заключаются в регулярном наблюдении за состоянием природных комплексов на территории подземного газохранилища, выявлении процессов и явлений, дестабилизирующих эти комплексы.

2.1.2.1. Периодичность наблюдений в каждом конкретном случае устанавливается в зависимости от стадии освоения и специфики геологической структуры, технологий эксплуатации газохранилища или ранее непредвиденной необходимости. Однако в самом общем случае циклическому характеру эксплуатации подземного хранилища газа должна соответствовать и цикличность геоэкологического мониторинга, при которой полевые (натурные) исследования на объекте с необходимым комплексом измерений и отбором проб (образцов) почво-грунтов, воды и газов для лабораторных исследований проводятся два раза в год: осенью, по завершении цикла закачки газа и достижении максимальных пластовых давлений в пластах-коллекторах, и весной, – по завершении отбора газа и достижении максимальных депрессий в пластовых системах. При этом понятие «непрерывный или регулярный геоэкологический мониторинг» предполагает неразрывность и непрерывность таких обязательных элементов и этапов мониторинга, как:

- полевые измерения и отбор проб для лабораторных исследований;
- полный комплекс лабораторно-экспериментального изучения проб (образцов) почво-грунтов, воды и газов;
- научно-техническая интерпретация результатов полевых и лабораторно-экспериментальных исследований в сопоставлении с геологическими условиями и технологией эксплуатации подземного хранилища газа;
- составление научного отчета по конкретному циклу геоэкологического мониторинга и разработка научно-практических рекомендаций по совершенствованию технологий эксплуатации объекта.

2.1.2.2. Основными объектами контроля и наблюдений в составе геоэкологического мониторинга подземного хранилища газа являются водоносные горизонты пресных питьевых вод (уровенный режим, ионно-солевой и газовый состав вод), подземное поровое пространство зоны аэрации и почвенного покрова (преимущественно газовый состав), наземные водоемы (реки, озера, искусственные пруды, родники, колодцы), а также атмосфера в пределах расположения подземного хранилища газа. В случае выявления экологических дестабилизаций в процессе наблюдений за указанными выше объектами для установления причин этих дестабилизаций и принятия мер по их устранению или минимизации привлекаются материалы производственно-технологического мониторинга (PV-режим циклической эксплуатации газового хранилища и его соответствие геолого-структурным и гидрогеологическим характеристикам объекта, вариации в пространственном положении ГВК, конструкции контрольных и наблюдательных скважин, качество затрубного цементационного раствора, внутри- и заколонные газопроявления и пр.).

2.1.3. В интересах повышения информативности геоэкологического мониторинга предусматриваются меры по совершенствованию систем контроля и наблюдений за работой подземного хранилища газа, бурение специальных скважин, восстановление ранее законсервированных или ликвидированных скважин. В свою очередь, результаты геоэкологического мониторинга могут служить серьезной мотивацией для оптимизации режимов эксплуатации подземного хранилища газа в пористых средах.

В соответствии с целью и задачами геоэкологического мониторинга, в его структуре предусматриваются три стадии работ:

- мониторинг нулевого цикла;
- мониторинг стадии опытно-промышленной эксплуатации;
- мониторинг промышленной эксплуатации подземного хранилища газа.

## 2.2 Мониторинг нулевого цикла

2.2.1 Мониторинг нулевого цикла осуществляется, как правило, еще до начала опытной закачки газа в пласты-коллекторы с целью создания базы данных по первоначальным (фоновым) характеристикам подземного и наземного пространства в пределах горного отвода и собственно геологической структуры подземного хранилища газа.

2.2.2 Информационное обеспечение работ на стадии мониторинга нулевого цикла может осуществляться как посредством специально ориентированного анализа литературных источников (материалы по региональной геологии и гидрогеологии, данные геолого-съёмочных и геологоразведочных работ, проект на создание подземного хранилища газа и пр.), так и прямым изучением природных комплексов по программе этого вида мониторинга.

2.2.3 Литолого-минералогический состав, геохимия и тепловое состояние осадочных пород. Из результатов исследований по этому направлению представляют интерес:

- данные о количестве и составе рассеянного или локализованного в породах органического вещества (преимущественно, люминисцентно-битуминологический анализ), седиментодиагенетическое и постдиагенетическое вторичное минералообразование ( $\text{FeS}$ ,  $\text{FeS}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  и др.) как вещественные свидетельства геохимических процессов прошлых геологических эпох;
  - компонентный состав свободных или сорбированных породой газов. Изотопный состав углерода углеводородных газов;
- первоначальные (фоновые) уровни  $\gamma$ -активности осадочных пород по материалам изучения керна и геофизических исследований скважин, в т.ч. теплового состояния осадочных образований с точностью измерения температур не менее  $0,05^\circ\text{C}$ .

2.2.4 *Анализ мощностей осадочных пород и карты схемы изопахит.* Дополнительный (по отношению к проектным данным) анализ мощностей осадочных пород в разрезе газохранилища представляется необходимым на стадии мониторинга нулевого цикла, поскольку позволяет получить более полную информацию по истории развития геологической структуры, количестве, времени и масштабах перерывов в осадконакоплении, тектоническом контроле седиментогенеза и, как следствие, наличии (или отсутствии) тектонически ослабленных зон в разрезе геологической структуры. Так, случаи контрастных изменений мощностей осадочных пород (пласты-коллекторы, водопорные толщи и пр.) на коротких расстояниях, фиксируемые при анализе карт-схем изопахит, должны рассматриваться как свидетельство блоковых тектонических подвижек в бассейне осадконакопления с формированием штамповых микроскладок и, что особенно важно, дизъюнктивных и (или) пликативных (флексуры) деформаций по их периферии.

2.2.5 Информация о *первоначальных пластовых давлениях*, их природе (гидростатические, с элементами передачи геостатических давлений и пр.), величинах и распределении в пластах-коллекторах и выше залегающих водоносных комплексах относительно основных структурных элементов газохранилища (сводовая часть антиклинали, погруженные части крыльев складки, зоны дизъюнктивных нарушений и пр.) является чрезвычайно важной фоновой гидродинамической характеристикой создаваемого подземного хранилища газа.

2.2.6 *Ионно-солевой и газовый состав подземных вод* является одной из важнейших фоновых характеристик газохранилища, с которой связаны не только величины и распределение гидростатических пластовых давлений, но и многие геохимические процессы, развивающиеся в подземной гидросфере под воздействием углеводородных газов (сероводородное брожение с использованием  $\text{SO}_2^-$  подземных вод и метана, выпадение веществ-кольматантов и пр.). В базе данных мониторинга нулевого цикла приводится полная химическая характеристика подземных вод (минерализация, ионный состав, pH, Eh, состав и концентрация водорастворенного органического вещества, в т.ч. спиртов), а также состав и давления насыщения водорастворенных газов.

2.2.7 Информация об *ионно-солевом и газовом составе вод поверхностного стока* (реки, озера, искусственные водохранилища) является обязательной в базе данных мониторинга нулевого цикла. Изменения в составе этих вод могут свидетельствовать (при отсутствии наземных источников загрязнителей) как о разгрузке глубоко залегающих водоносных комплексов под воздействием технологий подземного хранения газа, так и развитии геохимических процессов с участием метана, мигрирующего из пластов-коллекторов.

2.2.8 *Состав газовых композиций грунтов зоны аэрации, почвенного покрова и приземной атмосферы* является объектом постоянного геоэкологического мониторинга, в т.ч. мониторинга нулевого цикла, поскольку может служить достоверным индикатором присутствия (или отсутствия) метана, мигрирующего из пластов-коллекторов подземных газохранилищ.

### 2.3. Мониторинг стадии опытно-промышленной эксплуатации

2.3.1. Реальный геоэкологический контроль воздействия подземного хранилища газа на природные комплексы начинается со времени пробной закачки газа и продолжается до завершения стадии опытно-промышленной эксплуатации объекта, которая, в соответствии с мировым опытом, составляет от 3-4 до 5-6 лет в зависимости от геолого-гидрогеологических условий и технологий освоения подземного пространства.

2.3.2. Важнейшей целью геоэкологического мониторинга этой стадии освоения подземного хранилища газа является установление реального воздействия объекта на природные комплексы в сопоставлении с проектными ожиданиями, выяснение причинно-следственных связей экологических дестабилизаций с особенностями геологической структуры, технологий формирования и освоения искусственных газовых залежей, а также разработка научно обоснованных рекомендаций по совершенствованию технологий их эксплуатации путем оптимизации экологической безопасности и промышленных мощностей.

2.3.3. Основными объектами геоэкологического мониторинга являются водоносные горизонты и комплексы зоны активного водообмена, подземное поровое пространство зоны аэрации и почвенного покрова, водозаборы и колодцы питьевой воды, наземные водоемы, а также атмосфера в районе подземного газового хранилища. Для наблюдений и контроля уровня режима (как одного из параметров гидродинамики), а также газо-геохимического и теплового состояния пресных подземных вод, состава сорбированных почвой и почво-грунтами газов, а также состава приземного воздуха на территории объекта:

- используются (или переоборудуются из числа ликвидированных) специальные наблюдательные скважины (Рисунок 1), фильтровые колонны которых рассчитаны для контроля каждого водоносного горизонта;
- используются гидрогеологические скважины, эксплуатирующие водоносные горизонты с водами хозяйственно-питьевого назначения, надворные колодцы и наземные водоемы (озера, искусственные водохранилища, болота, реки), а также другие водопоявления (родники, вскрывающие грунтовые воды шурфы или закопушки);
- осуществляется отбор почвенных газов по профилям, ориентированным преимущественно вкрест простирания сводовой части геологической структуры, а также в зонах и перпендикулярно зонам тектонических нарушений (Рисунок 1). Для установления наличия или отсутствия затрубной миграции газов отбираются пробы почвенных газов по профилям, радиальным относительно тестируемой скважины.

С целью оценки *ожидаемых* рисков, их масштабов и времени проявления осуществляется наблюдение и контроль гидродинамического, газо-геохимического и теплового состояния подземных вод горизонтов, залегающих выше пласта-коллектора и ниже зоны активного водообмена, для чего используются наблюдательные многоцелевые скважины сети технологического контроля и наблюдений (Рисунок 1).

2.3.4. По программе мониторинга опытно-промышленной эксплуатации подземного хранилища газа производится лабораторно-экспериментальное изучение полученных проб воды и газов (см. ниже). Результаты химико-аналитических исследований оформляются и представляются для последующего анализа в виде таблиц, графиков, карт-схем и прочих материалов.

2.3.5. Результаты полевых (натурных) и лабораторно-экспериментальных исследований оцениваются методом сопоставления (сравнительный анализ) с материалами мониторинга нулевого цикла, а также предыдущих этапов мониторинга опытно-промышленной эксплуатации подземного хранилища газа. Все случаи изменения или превышения фоновых характеристик контролируемых объектов геоэкологического мониторинга (подземные и поверхностные воды, почво-грунты и атмосфера) должны стать основой для научно-технических интерпретаций с целью установления причинно-следственных связей между фактами экологических дестабилизаций, геолого-гидрогеологическими условиями и технологиями опытно-промышленного освоения подземных хранилищ газа.

2.3.6. Одним из важнейших результатов научно-технических интерпретаций материалов мониторинга стадии опытно-промышленного освоения подземного хранилища газа должно стать решение вопроса о зависимости уровня и масштабов экологических дестабилизаций от режима (параметров) циклической эксплуатации объекта. Подобное решение может быть положено в основу последующей минимизации экологических рисков методом перебора вариантов режима и параметров промышленной эксплуатации подземного хранилища газа в пористых средах.

2.3.7. По результатам геоэкологического мониторинга стадии опытно-промышленной эксплуатации хранилища газа разрабатываются научно-практические рекомендации по совершенствованию технологий дальнейшей эксплуатации объекта путем оптимизации экологической безопасности и промышленных мощностей.

#### 2.4. Мониторинг стадии промышленной эксплуатации объекта

2.4.1. Программа и основные задачи мониторинга стадии промышленной эксплуатации практически полностью соответствуют таковым для мониторинга опытно-промышленного освоения подземного хранилища газа.

2.4.3. Вместе с тем, проявляющиеся уже на стадии опытно-промышленной эксплуатации разно-масштабные экологические дестабилизации (что нормально для периода адаптации объекта к геолого-гидрогеологическим условиям вмещающей его геологической структуры) представляют собой новые и дополнительные объекты контроля и наблюдений, требующие все более тесного взаимодействия технологических служб и разработчиков программ геоэкологического мониторинга.

2.4.3. По результатам ежегодного геоэкологического мониторинга промышленной эксплуатации подземного хранилища газа разрабатываются научно-технические рекомендации по совершенствованию технологий дальнейшей эксплуатации объекта путем оптимизации экологической безопасности и промышленных мощностей.

#### Заключение и рекомендации

По результатам экологического мониторинга ПХГ создается заключение о состоянии природных комплексов и тенденции по их изменению, которое должно содержать:

- сведения о состоянии природной среды на момент обследования;
- сведения об источниках, видах, интенсивности, длительности и границах воздействия объекта на природные комплексы;
- оценку характера воздействия и прогнозирование изменения окружающей среды с учетом применяющихся технологий освоения или эксплуатации ПХГ;
- оценку вероятности чрезвычайных ситуаций и их последствий;
- оценку экологических и социальных последствий функционирования ПХГ;
- предложения по снижению отрицательного воздействия объекта на окружающую среду и здоровье населения.

Известные способы минимизации экологического риска при эксплуатации ПХГ, ориентированные преимущественно на уменьшение суммарных потерь газа, состоят из:

- варьирования (перебор вариантов) режимов эксплуатации ПХГ с целью выбора оптимальных параметров ( $P$  и  $V$ ), в наибольшей мере соответствующих особенностям геологической структуры и обеспечивающих минимальные потери газа при достаточно высокой рентабельности производства;
- изменением режима работы нагнетательных и эксплуатационных скважин с целью оперативно-регулируемого регулирования формы и местоположения искусственной газовой залежи относительно наиболее опасных (проницаемых) элементов геологической структуры, например, разрывных нарушений;
- создания «Гидравлических завес» на пути газовых потоков к зонам тектонических нарушений, что достигается строительством скважин двойного назначения – эксплуатационно-наблюдательных. В нормальных условиях эксплуатации ПХГ такие скважины используются в качестве наблюдательных, контролирующих гидродинамические и иные условия в пределах приразломных зон. В случае смещения газовой залежи к зоне разлома эти скважины функционируют как эксплуатационные, а после их обводнения и создания, таким образом, гидравлического экрана на пути к разлому – снова наблюдательных;
- обязательной утилизации газов в контрольных горизонтах с помощью системы разгрузочных скважин.