

Новые методические приемы выделения и картирования природных резервуаров для подземного хранения водорода в выработанных месторождениях углеводородов

И.В. Колоколова*, И.Н. Коновалова

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: *ipngkolokolova@yandex.ru

Аннотация. В статье предложены новые методические приемы выделения и картирования истинных и ложных флюидоупоров по данным геофизических методов, базирующиеся на основных положениях теории о трехслойном строении природных резервуаров нефти и газа.

Сейсморазведка в комплексе с геофизическими исследованиями в скважинах позволяют контролировать объемы хранилища, определять контур газо-водяного контакта, получать детальные модели природного резервуара.

Ключевые слова: водород, подземное хранилище, природный резервуар, коллектор, флюидоупор, сейсморазведка, геофизические исследования в скважинах.

Для цитирования: Колоколова И.В., Коновалова И.Н. Новые методические приемы выделения и картирования природных резервуаров для подземного хранения водорода в выработанных месторождениях углеводородов // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 3(30). С. 3–12. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-30.art1>

В наши дни водород выступает как один из промышленных газов, который уже десятилетиями используют в химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Основным источником энергии для производства водорода – природный газ. Главный способ производства – паровая конверсия метана. Если прошлое и настоящее водорода связаны с понятием «промышленный газ», то будущее – с понятием «новый энергоноситель» [1].

Ежегодно из глубин Земли выделяется примерно 5 млн т водорода. Водород – летучий элемент, обладающий низкой температурой ожигения и высокой взрывоопасностью. В связи с этим разработка экономически и технически эффективных и безопасных систем его хранения представляет собой актуальную задачу. Во многих литературных источниках

предлагается хранить водород в подземных хранилищах газа (ПХГ), а именно: в истощенных месторождениях углеводородов; в водоносных пластах, в подземных соляных кавернах и пещерах, в многолетнемерзлых породах, в подземных полостях, выработанных шахтах [2]. Из перечисленных вариантов многолетнемерзлые породы представляются неподходящим объектом для сооружения хранилища из-за своей хрупкости и возможных перемен климата. Подземные полости, каверны, пещеры и выработанные шахты также не подходят из-за проблем с экранированием предполагаемых газохранилищ. Таким образом, наиболее предпочтительными хранилищами водорода являются выработанные месторождения углеводородов (УВ) или соляные каверны (пещеры), см. рис. 1, 2.

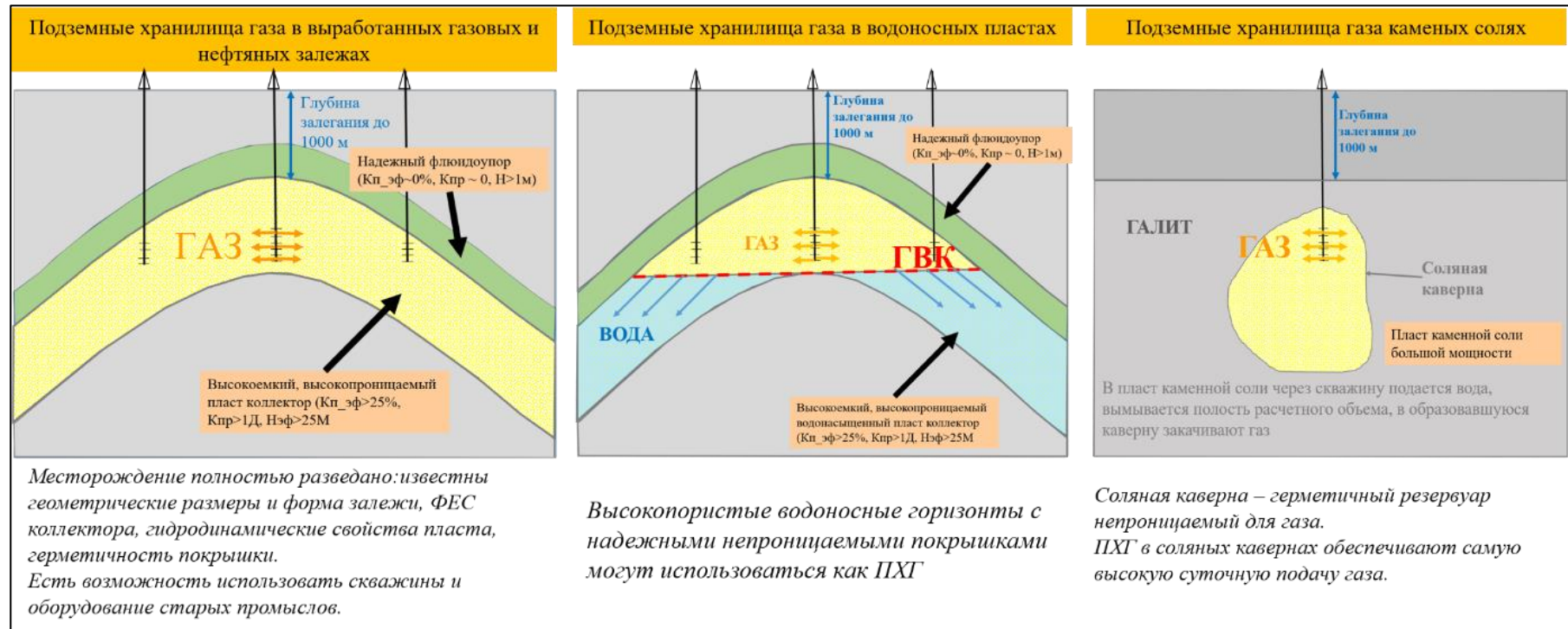


Рис. 1. Типы объектов подземного хранения газа

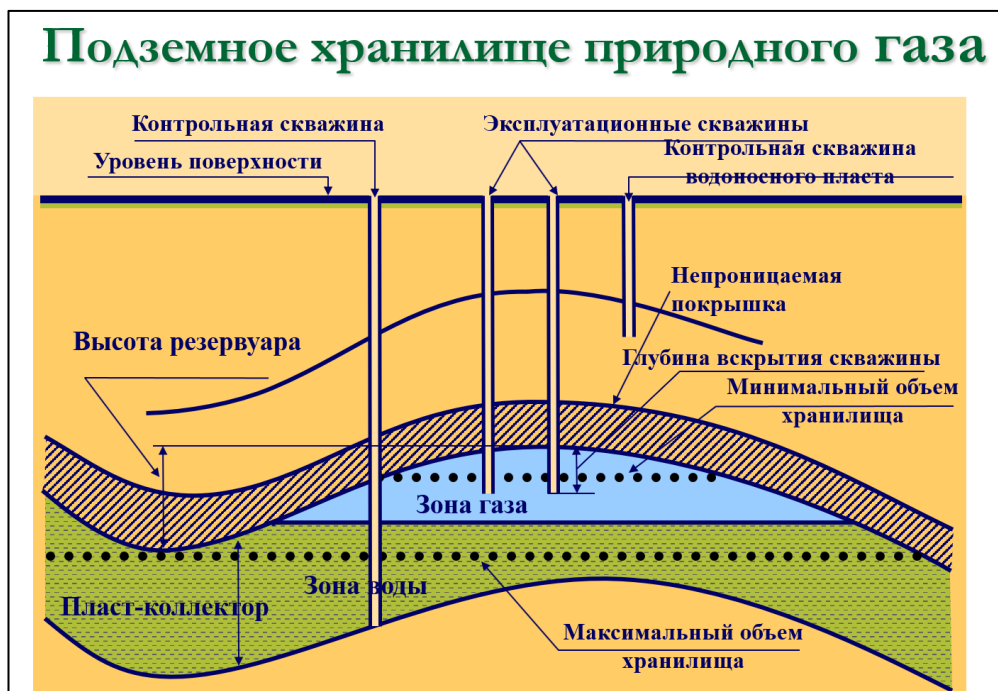


Рис. 2. Схема хранилища водорода в водоносном горизонте, образующем антиклинальную структуру и ограниченном сверху флюидоупором (К.С. Басниев, 2008 г.)

Далее рассмотрим более подробно вариант подземного хранилища (ПХ) водорода в выработанных месторождениях нефти и газа.

Месторождение нефти и газа – это место скопления залежей УВ, приуроченных к одной или нескольким естественным ловушкам, расположенным на одной локальной площади [3]. Известно, что ловушка – это часть природного резервуара, представляющая собой геологический объект замкнутого контура, ограниченный экранирующей породой – флюидоупором, который способен улавливать и сохранять углеводороды в породах-коллекторах. Благоприятное сочетание трех элементов – ловушки, флюидоупора и коллектора под ним представляет собой природный резервуар, где можно прогнозировать открытие месторождения УВ, а в данном случае – хранение газа. Таким образом, ПХ для водорода будет представлять собой природный резервуар, объем которого

определяется потенциалом пласта коллектора ($K_p > 25\%$, $K_{пр} > 1$ Дарси), а надежность – наличием флюидоупора ($K_{п_эф} \sim 0$, $K_{пр} \sim 0$). Флюидоупор – непроницаемый пласт, перекрывающий пласт-коллектор, от качества которого зависит сохранность закачанного газа. Поэтому знания о наличии, качестве, положении в разрезе флюидоупоров являются необходимым условием в работе ПХГ. Однако вопрос экранирования в хранилищах в настоящее время проработан очень слабо, тогда как его значимость признается многими учеными.

Для выделения и картирования природных резервуаров подземного хранения водорода авторы статьи предлагают новые методические приемы комплексной интерпретации геофизических исследований в скважинах (ГИС) и сейсморазведки с использованием элементов теории их трехслойного строения (Филиппов Б.Н., 1967 г.; Ильин В.Д., 1980–1990 гг.).

Согласно этой теории, в толщах пород-неколлекторов выделяются не только истинные флюидоупоры (ИФ), но и промежуточные пласты – ложные флюидоупоры (ЛФ). Экранирующие свойства таких пород невысоки, однако их наличие существенно меняет представление об объеме (наличии) залежи. Ложные флюидоупоры не являются препятствием для миграции углеводородов, поэтому для каждой ловушки – части природного резервуара – гидрозамок или точка просачивания углеводородов в следующую

по восстанию пластов ловушку находится на критическом направлении, но не в кровле пласта-коллектора, а в подошве ИФ. Следовательно, ловушка, в которой может формироваться залежь УВ, существует только в том случае, если амплитуда антиклинали по кровле коллектора больше толщины ложного флюидоупора ($A > T$), образующего экранированный объем (рис. 3а). Ловушка отсутствует, если амплитуда антиклинали по кровле коллектора меньше толщины ЛФ ($A < T$) и экранированный объем не образуется, (рис. 3б) *.

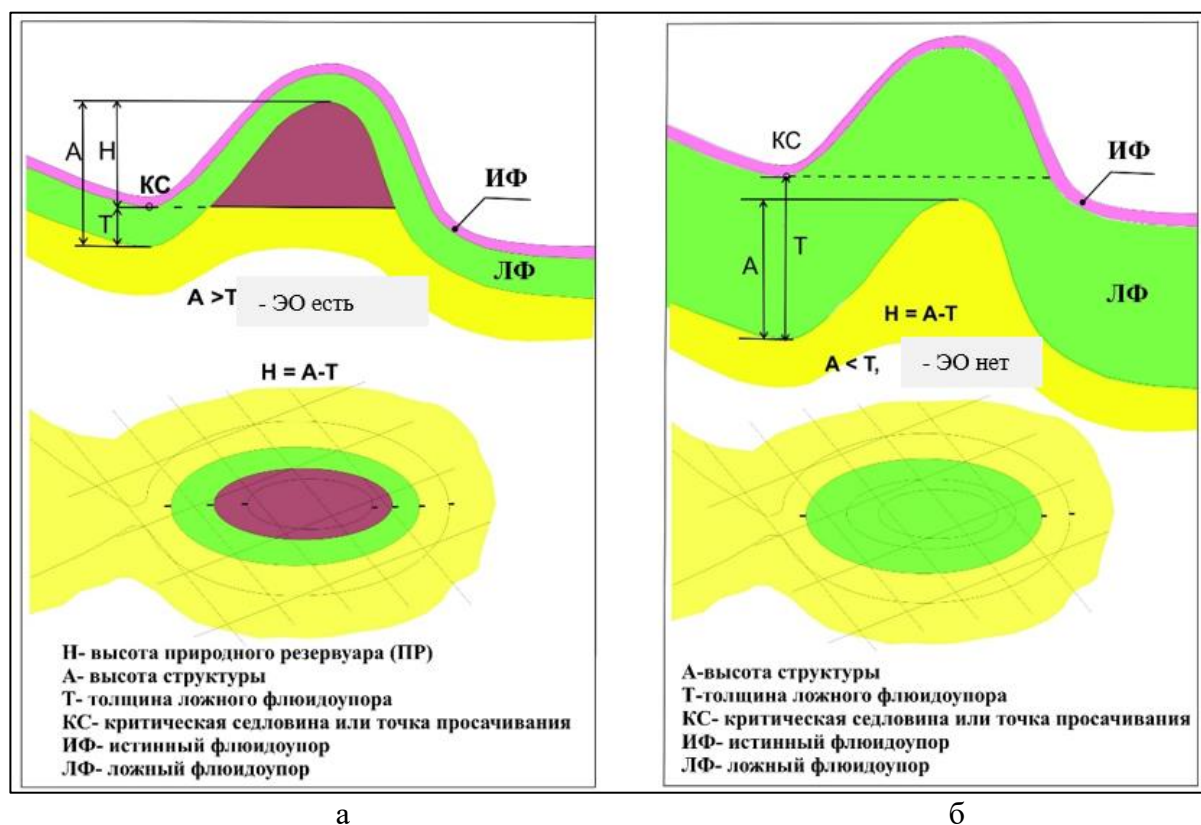


Рис. 3. Условия наличия (а) или отсутствия (б) экранированного объема (ЭО) *

Блок-схема работ состоит из нескольких этапов.

На первом этапе по данным геофизи-

ческих исследований в скважинах определяются границы коллекторов и флюидоупоров.

* Научные основы прогнозирования разномасштабных месторождений нефти и газа в осадочных бассейнах: Отчет о НИР / Рук-ль темы Хитров А.М. М.: ИПНГ РАН, 2006. С.27–29.

Выделение флюидоупоров выполняется по качественным и количественным признакам с использованием радиоактивного каротажа, метода потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС), кавернометрии, методов электрометрии, акустического каротажа, плотностного каротажа, с учетом описаний керна, данных геолого-технологических исследований (ГТИ) и др.

Для подземных хранилищ водорода (ПХВ) наилучшими флюидоупорами являются соли и ангидриты, коллекторами – песчаники и алевролиты.

Ангидриты по ГИС характеризуются максимальными значениями на кривых сопротивления, отсутствием проникновения бурового раствора, неразрушенным стволом скважины ($D_c = D_{ном}$), максимальными показаниями на кривых микрозондов, минимальными – на кривых глинистости (полученных методами ПС и ГК – гамма-каротажа), максимальными значениями кривых нейтронных методов.

Галиты (соли) имеют максимальные значения на кривой ρ_n , зона проникновения отсутствует, при предельном насыщении раствора солью $D_c = D_{ном}$, показания микрозондов минимальные при $D_c \gg D_{ном}$, очень низкие значения ГК, показания нейтронных методов меняются от средних до очень высоких в зависимости от изменения D_c .

Качественными признаками терригенных коллекторов, по данным ГИС, являются: глинистая корка на кавернограмме; положительное приращение значений ρ_k на диаграммах микрокаротажа; радиальный градиент сопротивлений, устанавливаемый по данным разноглубинных зондов метода сопротивлений; отрицательные аномалии ПС различной амплитуды. Значения естественной гамма-активности коллекторов

отличаются от вмещающих пород. На диаграммах акустического каротажа отмечаются пониженные относительно глинистых пород значения интервального времени Δt .

Выделение флюидоупоров осуществляется на основании определения граничных численных значений «истинный – ложный» флюидоупор. Это статистическая граница такая же, как «коллектор – неколлектор», и в каждом случае ее следует устанавливать вновь для конкретного района (объекта). Предлагаемый подход основан на сопоставлении параметра, характеризующего насыщение горных пород, с параметром, отражающим их литоэмкостные свойства. Для определения насыщения породы используется кривая удельного электрического сопротивления (УЭС). В качестве параметра, характеризующего литоэмкостные свойства породы, используется отношение показаний нейтронного метода (НК) к показаниям метода естественной радиоактивности (ГК). Первоначально выполняется литологическое расчленение разреза, выделение коллекторов и потенциальных флюидоупоров, рассчитывается отношение НК/ГК, проводится нормировка отношения НК/ГК к кривой УЭС (R_p) (по глинистым и плотным породам) По итогам нормировки неколлекторы разделяются на истинные и ложные флюидоупоры [4].

Следующий шаг – по данным сейсморазведки, в отличие от стандартных структурных построений по целевым отражающим горизонтам, отдельно картируются элементы природных резервуаров. Первоначально увязываются данные ГИС с волновым полем и затем строятся карты в подошве истинного флюидоупора и кровле коллектора.

Это позволяет определить высоту хранилища. По динамическим характеристикам волнового сейсмического поля выделяются области распространения истинных флюидоупоров и их непрерывность. Полученная информация является основой для картирования природного резервуара, внутри которого прогнозируется хранение водорода [5].

Возможности выделения и картирования флюидоупоров и коллекторов по данным каротажа и сейсморазведки, алгоритм работ представлены на рис. 4–6. Результаты комплексной интерпретации данных ГИС и сейсморазведки являются основой для оценки рисков латеральных утечек газа из ПХГ и подсчета эффективного объема газохранилища.

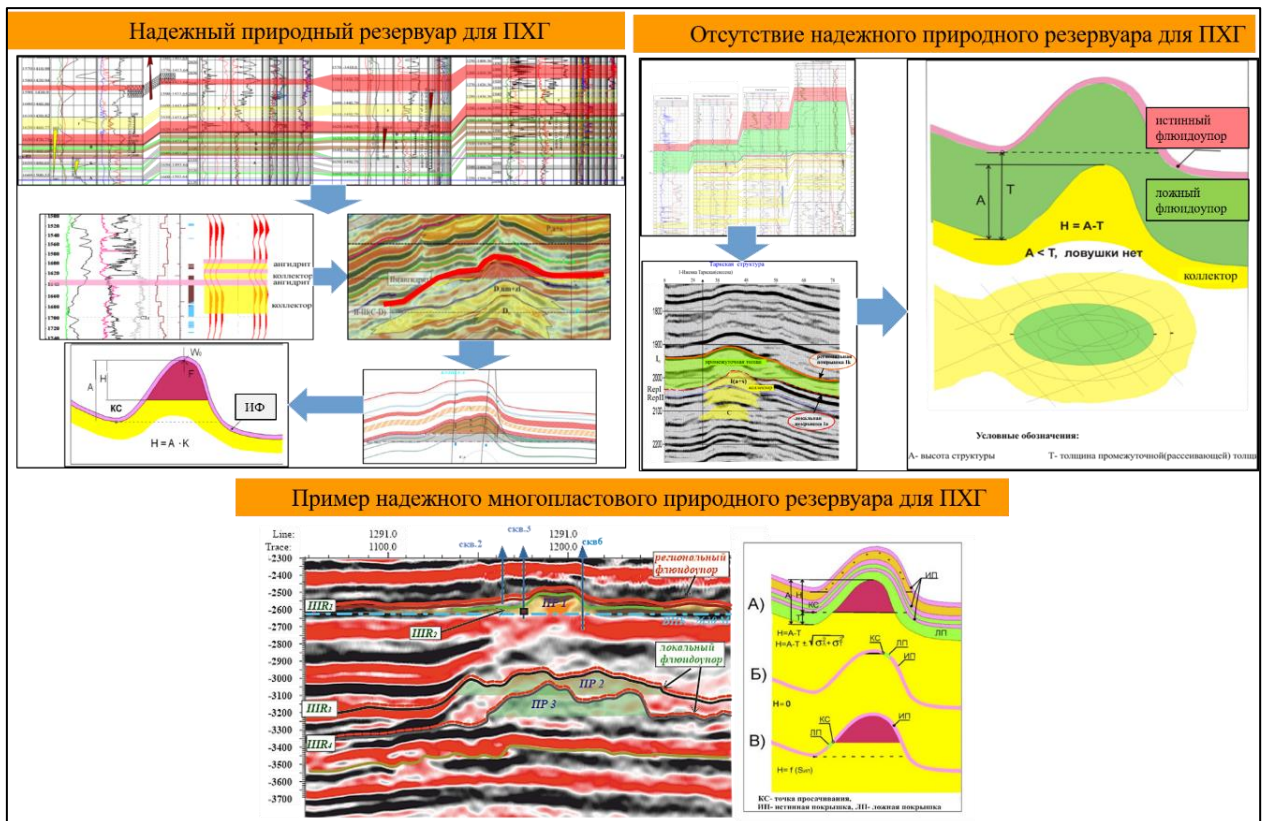


Рис. 4. О возможностях картирования флюидоупоров и коллекторов по результатам комплексной интерпретации данных ГИС и сейсморазведки

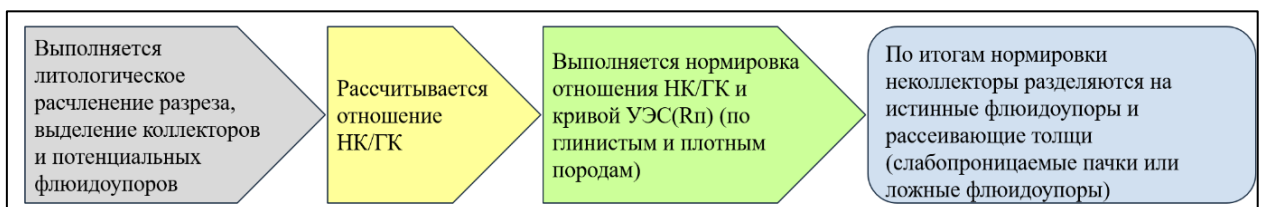


Рис. 5. Методика выделения флюидоупоров по данным ГИС

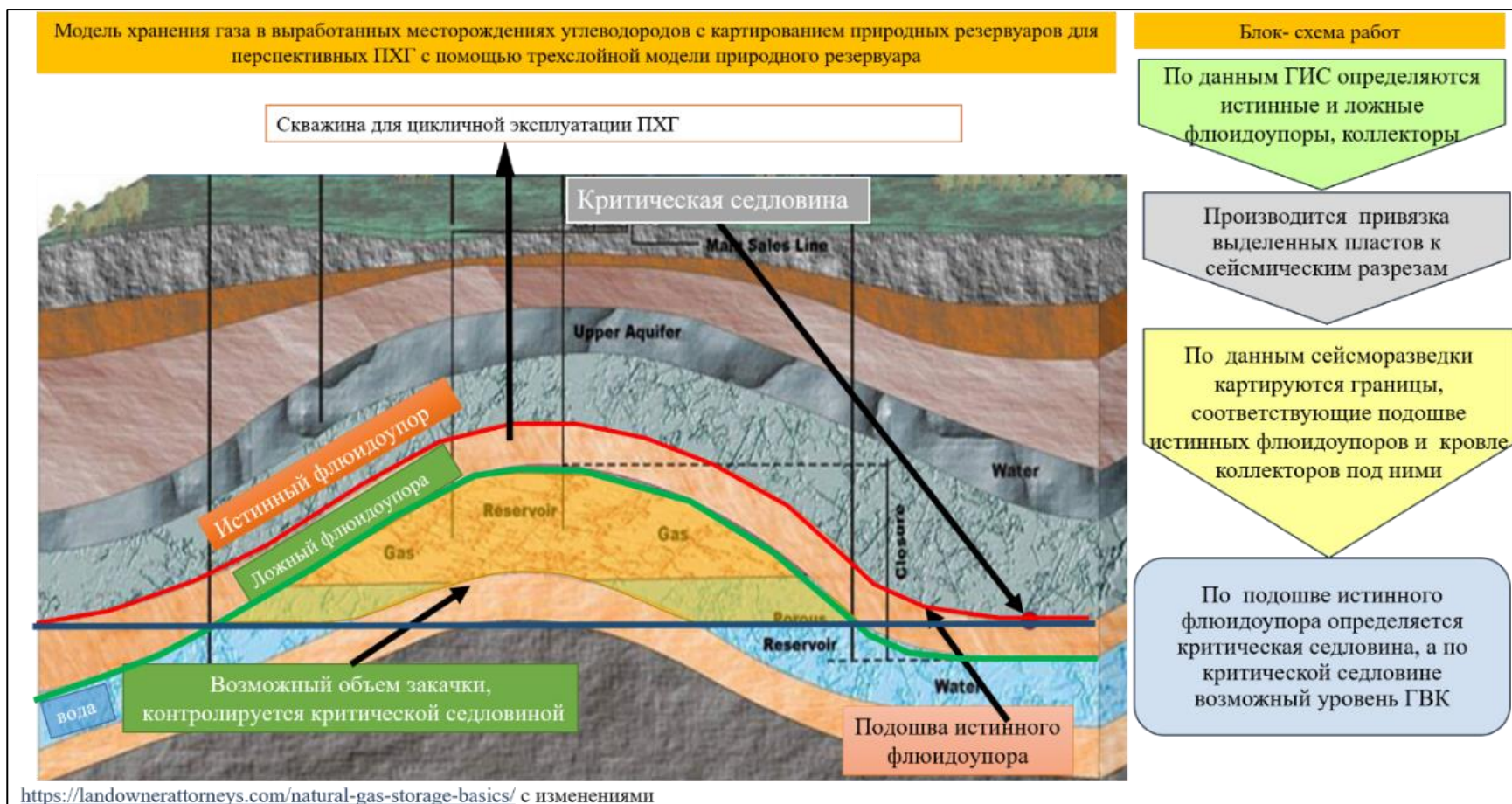


Рис. 6. Методика выделения флюидоупоров по данным сейсморазведки (<https://landownerattorneys.com/natural-gas-storage-basics/> с изменениями)

На рис. 7 приведен пример выделения флюидоупора и коллектора под ним по данным ГИС.

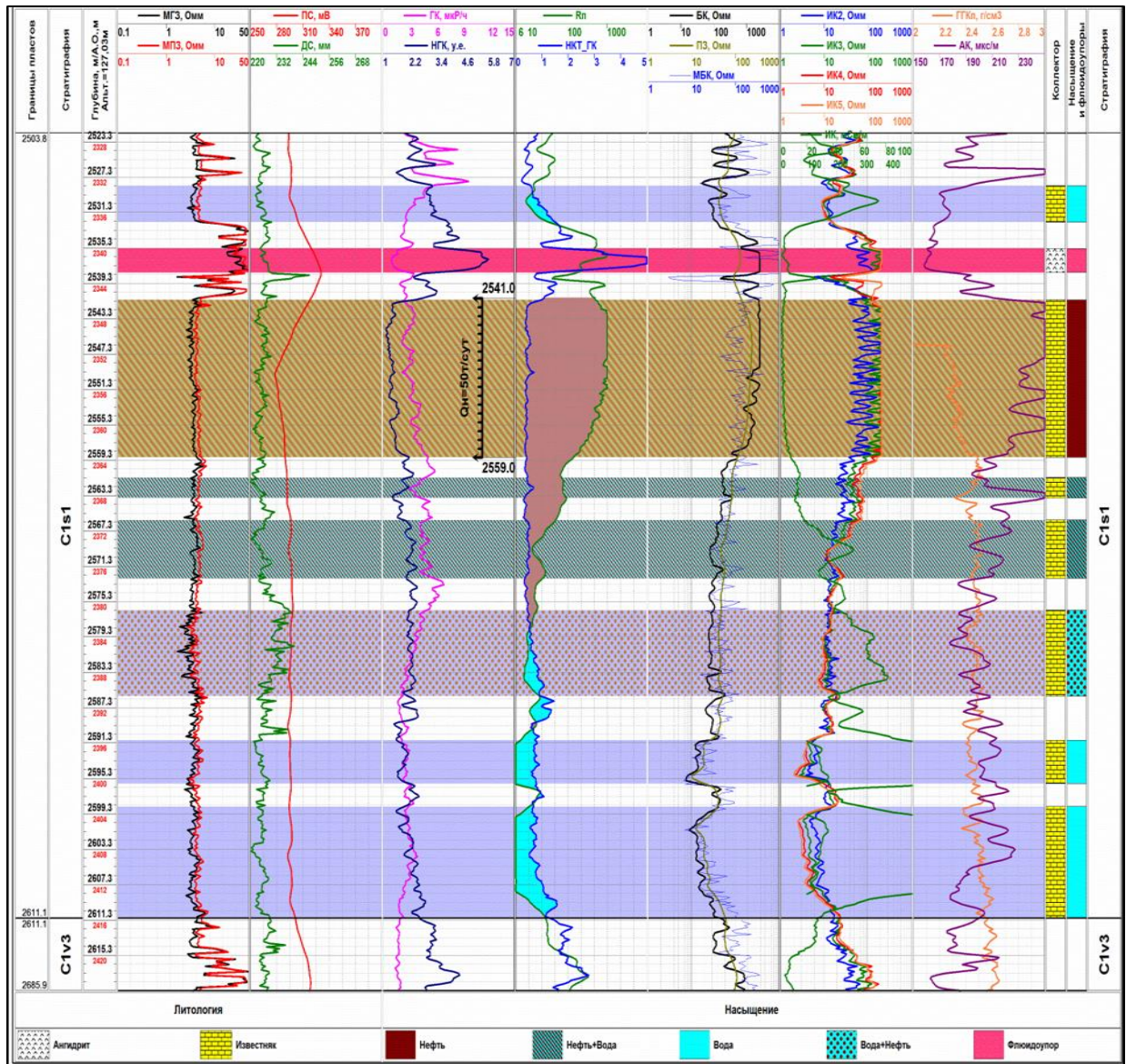


Рис. 7. Пример выделения надежного маломощного сульфатного флюидоупора и высокоемкого коллектора под ним по данным ГИС

Выводы

1. Наиболее предпочтительными хранилищами водорода являются выработанные месторождения УВ или соляные каверны (пещеры);

2. Природные резервуары для подземного хранения водорода в выработанных месторождениях должны обладать следующими признаками:

– амплитуда структуры и высота выработанной залежи значительны;

– истинный флюидоупор представлен галогенными, эвапоритовыми и сульфатными породами;

– толщина ложного флюидоупора минимальна или отсутствует совсем;

– коллектор обладает высокими свойствами и имеет наиболее инертный состав – не склонный вступать в реакцию с водородом (кварцевые песчаники и алевролиты?);

– отсутствуют разрывные нарушения и гидродинамические окна.

3. Основные геологические неопределенности при создании и эксплуатации ПХВ в выработанных

месторождениях – экранирующие свойства флюидоупоров;

4. При циклическом характере использования ПХВ важно понимание максимально возможных объемов закачивания водородной смеси, чтобы не допустить перетоков газа за пределы природного резервуара, что в свою очередь ухудшит проектные показатели.

5. Предлагаемые новые методические приемы выделения и картирования истинных и ложных флюидоупоров по данным геофизических методов позволят получать кондиционные модели природного резервуара, контролировать объемы хранилища, определять контур ГВК, тем самым снижая риски использования ПХВ.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Научное обоснование оптимальных условий подземного хранения водорода совместно с метаном», АААА-А19-119101690016-9).

Литература

1. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д. Водородная экономика – Путь к низкоуглеродному развитию. М.: Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО, 2019. 60 с. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15540.91524>

2. Басниев К.С., Выродова И.В., Бадюк Е.А. Подземное хранение водорода // Наука и техника в газовой промышленности. 2008. № 3(34). С. 87–94.

3. Бакиров А.А., Бакиров Э.А., Габриэлянц Г.А. и др. Теоретические основы поисков и разведки нефти и газа. В 2 т. Кн.2. Методика поисков и разведки скоплений нефти и газа. М.: Недра, 2012. 416 с.

4. Колоколова И.В., Данилова Е.М., Попова М.Н., Хитров А.М. Планирование бурения на основе новых подходов к выделению и картированию элементов природных резервуаров по данным комплексной интерпретации ГИС и сейсморазведки // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2020. № 8. С. 51–56. [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2020-8\(344\)-51-56](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2020-8(344)-51-56)

5. Колоколова И.В., Коновалова И.Н. Исследование истории вопроса оценки и картирования флюидоупоров при выборе наилучших природных резервуаров для подземного хранения газа // «Рассохинские чтения»: Материалы XII международной конференции. В 2 ч. Ухта: УГТУ, 2020. Ч. 2. С. 23–27.

New methods for isolation and mapping of natural reservoirs for underground hydrogen storage in depleted hydrocarbon deposits

I.V. Kolokolova*, I.N. Konovalova

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: *ipngkolokolova@yandex.ru

Abstract. The article proposes new methodological techniques for identifying and mapping true and false seals based on the data of geophysical methods, according to the main provisions of the theory of the three-layer structure of natural oil and gas reservoirs.

Seismic exploration in combination with well logging makes it possible to control the storage volumes, determine the gas-water contact contour and obtain detailed models of the natural reservoir.

Keywords: hydrogen, underground storage, natural reservoir, reservoir rock, seal, seismic exploration, well logging.

Citation: *Kolokolova I.V., Konovalova I.N.* New methods for isolation and mapping of natural reservoirs for underground hydrogen storage in depleted hydrocarbon deposits // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 3(30). P. 3–12. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-30.art1> (In Russ.).

References

1. *Mitrova T., Melnikov Yu., Chugunov D.* Hydrogen economy – the path to low-carbon development. Moscow: Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO, 2019. 60 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15540.91524> (In Russ.).
2. *Basniev K.S., Vyrodova I.V., Badyuk E.A.* Underground hydrogen storage // Science and Technology in the Gas Industry. 2008. No. 3(34). P. 87–94. (In Russ.).
3. *Bakirov A.A., Bakirov E.A., Gabrielyants G.A.* et al. Theoretical foundations of prospecting and prospecting for oil and gas. In 2 vols. Book 2. Methods of prospecting and exploration for oil and gas accumulations. Moscow: Nedra, 2012. 416 p. (In Russ.).
4. *Kolokolova I.V., Danilova E.M., Popova M.N., Khitrov A.M.* Planning of drilling operations based on new approaches to identification and mapping of hydrocarbon reservoirs elements based on complex interpretation of GIS and seismic survey data // Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields. 2020. No. 8. P. 51–56. [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2020-8\(344\)-51-56](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2020-8(344)-51-56) (In Russ.).
5. *Kolokolova I.V., Konovalova I.N.* Investigation of the history of the assessment and mapping of seals when choosing the best natural reservoirs for underground gas storage // Rassokhin Readings: Proceedings of the International Conference. In 2 parts. Ukhta: Ukhta State University, 2020. Part 2. P. 23–27. (In Russ.).