

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №4, Том 12 / 2020, No 4, Vol 12 <https://esj.today/issue-4-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/52SAVN420.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Гончарова В.В., Ерошкин Д.В., Чемезов И.И., Леченко Г.Е., Волков К.Р., Маслеев А.В. Новые технологии выбора места и оценки соляных структур для подземных хранилищ природного газа // Вестник Евразийской науки, 2020 №4, <https://esj.today/PDF/52SAVN420.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Goncharova V.V., Eroshkin D.V., Chemezov I.I., Lechenko G.E., Volkov K.R., Masleev A.V. (2020). New technologies for site selection and evaluation of salt structures for underground natural gas storage. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 4(12). Available at: <https://esj.today/PDF/52SAVN420.pdf> (in Russian)

УДК 72

**Гончарова Виктория Владимировна**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: [goncharova.vv@students.dvfu.ru](mailto:goncharova.vv@students.dvfu.ru)

**Ерошкин Дмитрий Владимирович**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: [eroshkin.dv@students.dvfu.ru](mailto:eroshkin.dv@students.dvfu.ru)

**Чемезов Илья Игоревич**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: [chemezov.ii@students.dvfu.ru](mailto:chemezov.ii@students.dvfu.ru)

**Леченко Геннадий Евгеньевич**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: [lechenko.ge@students.dvfu.ru](mailto:lechenko.ge@students.dvfu.ru)

**Волков Кирилл Романович**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: [volkov.vk@students.dvfu.ru](mailto:volkov.vk@students.dvfu.ru)

**Маслеев Александр Владимирович**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: [masleev.av@students.dvfu.ru](mailto:masleev.av@students.dvfu.ru)

**Новые технологии выбора места и оценки соляных структур для подземных хранилищ природного газа**

**Аннотация.** Хранилища природного газа являются важным элементом всей отрасли, так как позволяют сгладить неравномерность спроса на природный газ, связанную с сезонностью использования газа для отопления и генерации энергии. Одним из наиболее удобных видов хранилищ газа являются гидроизолированные соляные пещеры. В представленной статье рассматривается вопрос выбора оптимальных соляных каверн в качестве потенциальных хранилищ природного газа, основываясь на гидрогеологическом анализе и использовании современных технологий разведки литологии месторождений нефти и газа. Также в представленной работе рассматриваются факторы, влияющие на условия хранения природного газа, связанные с качеством сырья. В работе были предложены принципы выбора мест хранения газа на основе анализа геологии и состояния земной поверхности, а также была предложена новая технология для оценки условий строительства хранилищ газа в соляных кавернах. Применив предложенные принципы были проанализированы некоторые соляные шахты в различных регионах с высоким потреблением природного газа. На выбранных территориях были оценены условия строительства хранилищ природного газа. Были использованы критерии оценки, такие как тип структуры, глубина залегания, мощность соленосного слоя, содержание NaCl, наличие экранирующих пород, а также состояние поверхности земли, наличие источников воды и расстояние до действующих газотранспортных сетей. К важным факторам также были отнесены прочность пород и растворимость солей. Представленная работа может послужить опорой при подготовке проектов по строительству подземных хранилищ природного газа как на территории нашей страны, так и по всему миру. Особенно актуальным это направление исследований является для регионов с высоким импортом природного газа и высокой неравномерностью потребления.

**Ключевые слова:** подземные хранилища; природный газ; неравномерность потребления; геологические критерии; соляные структуры; мощность пласта; содержание соли; каротаж скважин; измерение пористости

## Введение

Одной из наиболее важных особенностей современного рынка природного газа является ярко выраженная неравномерность спроса на природный газ среди потребителей этого вида топлива. В первую очередь это связано с сезонностью изменения погодных условий и средней температуры воздуха в различных регионах [1]. Так, очевидно, что пик потребления природного газа приходится на зимний период среди стран с низкой температурой воздуха в этот период. Кроме того, пик потребления голубого топлива приходится на летний период в странах, расположенных в экваториальных широтах, где природный газ используется для работы компрессоров систем кондиционирования воздуха в помещениях. По этой причине возникает необходимость в строительстве хранилищ природного газа, так как мощности даже самых крупных газопроводных систем не позволяют удовлетворить пиковый спрос, в то время как в сезон низкого потребления газа, газопроводы вынуждены работать с недогрузкой. Строительство наземной инфраструктуры по хранению природного газа является чрезвычайно капиталоемким и, следовательно, повышает стоимость природного газа для конечных потребителей. На сегодняшний день наиболее привлекательными с точки зрения экономической эффективности являются подземные хранилища природного газа различных типов. Природный газ может храниться в выработанных месторождениях нефти и газа, водонасыщенных горизонтах, а также в полостях образованных движением соляных пластов [2].

В мире используется около 700 подземных хранилищ природного газа с общим объемом более 410 миллиардов кубических метров. Среди них более 100 подземных хранилищ, расположенных в соляных выработках и пещерах. По общему хранилища такого типа занимают

более 9 %. Рабочее давление для подземных хранилищ, расположенных в соляных пластах ниже, чем в хранилищах других типов (месторождения природного газа и водоносные горизонты с высокой пористостью). Тем не менее, пиковая скорость отбора из хранилищ, расположенных в соляных пластах примерно в 3 раза больше, чем в хранилищах других типов. Таким образом, хранилища природного газа, расположенные в соляных пластах, являются наилучшими кандидатами для сглаживания пикового потребления газа особенно в случае непредвиденных обстоятельств [3].

Исследования в области оценки возможности использования соляных структур в качестве подземных хранилищ природного газа в основном сконцентрированы на оценке механизма растворения солей в воде, контроль выщелачивания и оценке стабильности [4].

Главной целью представленной работы является создание критериев для выбора соляных образований. Кроме того, предлагается использовать технологии разведки нефтегазовых месторождений, а именно данные каротажа существующих скважин в районах предполагаемой перспективной территории для получения данных о пригодности использования солевой структуры для хранения природного газа. Таким образом, представленная работа имеет перспективы для развития создания хранилищ природного газа в районах, не связанных с добычей природного газа или нефти.

### Обзор мирового опыта

Среди эксплуатируемых на сегодняшний день хранилищ природного газа наименьший объем (0,005 млрд м<sup>3</sup>) имеет хранилище Лейси Филд в США. Максимальный рабочий объем (2 млрд м<sup>3</sup>) имеет хранилище Этзель в Германии. Кроме того, интересно проанализировать количество хранилищ различного объема от общей доли. Так хранилища с рабочим объемом мене 0,5 млрд м<sup>3</sup> составляют более 70 % от общего числа хранилищ. В тоже время хранилища с рабочим объемом более 1 млрд м<sup>3</sup> составляют менее чем 17 % от общего числа. Другими словами, большинство подземных хранилищ представлены именно небольшими структурами соляных образований [5].

Относительно глубины залегания подземное хранилищем, которое находится ближе всего к земной поверхности (глубина – 480 м), является хранилище Вефиль в США. Самое глубокое хранилище (2000 м) – хранилище Олдбро в Великобритании. Абсолютное большинство хранилищ в мире находятся на глубине от 500 до 1500 м.

Мощность солевой структуры в большинстве случаев больше 200 м. Также в структурах преимущественно присутствует несколько полостей (чаще всего меньше 10). Значения содержания NaCl в основном составляет от 70 до 80 % [6].

### Основные принципы выбора площадки для хранилища в солевых структурах

На сегодняшний день подземные хранилища природного газа чаще всего строятся в стабильных солевых куполообразных структурах с высокой мощностью соленого пласта. Однако, на практике гораздо чаще встречаются соляные каверны и другие структуры терригенной озерной фракции. Мощность таких структур, а также их площадь часто ограничена. Также для таких структур характерно большая разница в свойствах слагающих эти структуры фаций, многочисленные парагенезисы, низкое содержание NaCl и высокое содержание нерастворимых в воде компонентов. Учитывая такие свойства солевых структур, необходимо предложить принципы выбора площадки, подходящей для подземного хранения газа по геологическим характеристикам соляных шахт.

## Геологические условия

**Структура.** Одним из самых главных факторов при выборе места под строительство подземного хранилища природного газа является наличие подходящей геологической структуры. Наличие структуры должно быть подтверждено, а также конфигурация структуры должна быть проста и понятна. Это является важным фактором, так как любые затраты на определение формы и свойств комплексных геологических структур являются крайне нежелательными, так как ведут к удорожанию общей стоимости проекта и, соответственно, ведут к снижению экономической привлекательности проекта. По этой причине так активно используются выработанные месторождения природного газа и нефти, так как в процессе разработки месторождения зачастую проводится огромное количество исследований, а также проводится дорогостоящее компьютерное моделирование, которое в сочетании с данными тестов скважин дает детальное представление о свойствах породы коллектора.

Одним из важнейших геологических свойств рассматриваемых структур является наличие разломов, а также их проницаемость. Другими словами, являются ли рассматриваемые разломы изолирующими или они нарушают герметичность резервуара [7].

**Глубина.** Рекомендуемая глубина выбираемой структуры от 500 до 1500 м. Оптимальная глубина составляет 1000 м. При этой глубине давление пласта является оптимальным и требуется меньше усилий для работы с такой структурой как в вопросах наполнения, так и отбора газа. С увеличением глубины залегания образования емкость хранилища может быть увеличена за счет сжимаемости природного газа под давлением на большей глубине. Однако, если глубина залегания больше 1500 м, то увеличение скорости ползучести соляных пород может привести к увеличению годового коэффициента усадки каверны. Для того, чтобы контролировать годовой коэффициент усадки каверны, необходимо увеличить нижний предел давления. По этой причине будет снижен интервал рабочего давления, а, следовательно, будет снижена емкость хранилища, при сохранении высоких затрат на работу компрессорных агрегатов при закачке на большую глубину. Кроме того, все равно сохраняется опасность проседания грунта за счет движения мобильных соляных образований [8].

**Мощность соленых пластов.** В предлагаемой методике оценки привлекательности той или иной геологической структуры рассматривается рекомендованная толщина пласта более 100 м, а также содержание соли более 70 %. Один солевой слой должен быть равномерно распределен по толщине пласта с минимально возможным количеством прослоек и минимальной толщиной этих прослоек.

**Содержание NaCl.** Составное содержание NaCl, которое рассчитывается из средневзвешенного значения толщины образования, а также содержания NaCl в солевых слоях и прослойках использовались в качестве скринингового индекса. То есть на основе данного параметра производилось сравнение различных структур. В представленной методике предлагается использовать критерий содержания NaCl выше 60 %. Этот параметр является важным, так как отвечает за стабильность структуры и высокое содержание NaCl, и говорит о более безопасной для экологии, а также для здоровья и жизни людей структуре [9].

**Изолирующий слой.** В верхней части образования должен присутствовать гидроизолирующий слой толщиной не менее 30 м, а распределение этого слоя по толщине должно быть устойчивым без прослоек гидравлически проницаемых пород.

**Площадь.** Одним из факторов, влияющих на объем проектируемого в рассматриваемой структуре хранилища, является площадь структуры. Площадь также необходима для установки площадки на поверхности земли и расположения оборудования.

### **Пример рассматриваемой структуры для создания подземных хранилищ природного газа в регионах-потребителях**

Одним из наиболее перспективных направлений для строительства подземных хранилищ природного газа является Китай. Эта страна является одним из самых крупных потребителей природного газа, и с каждым годом спрос на этот источник топлива в Китае только растет. В качестве примера возможного месторасположения для подземного хранилища газа было рассмотрено солевое образование Фугинской свиты палеогена, находящееся в дельте реки Янцзы. Эта структура находится в 35 км от действующего магистрального газопровода. Глубина залегания кровли пласта составляет от 800 до 1200 м, так как структура обладает антиклинальной формой и имеет высокий уклон, мощность пласта варьируется в пределах от 90 до 290 м. В структуре наблюдается около 10 прослоек, которые равномерно распределены по всей толщине пласта. Мощность самой толстой прослойки составляет 5 м. Остальные имеют мощность 1–2 м. Содержание соли составляет около 80 %. Без проведения дополнительных исследований по определению пористости структуры достаточно сложно судить о возможном объеме предлагаемого хранилища. Однако, примерную оценку может дать объемный метод с использованием Monte Carlo Simulation для учета вероятности неточности используемых данных. По такому типу анализа объем предлагаемой структуры составляет 0,4 млрд м<sup>3</sup> [10].

### **Технологии оценки условий строительства хранилища**

Структурная оценка направлена на подтверждение морфологии соленосной структуры. В представленной работе предлагается строительство вертикальной скважины на этапе проектирования подземного хранилища, где в последствии будут производиться комплекс исследований по определению всех основных геологических условий. В рамках исследований такой скважины предлагается использовать каротаж на электрическом кабеле для измерения плотности, пористости с помощью нейтронного внутрискважинного аппарата, а также измерения скорости звука в породе. Эти три типа измерений в комплексе могут позволить рассчитать M-N функцию и детально определить литологию вдоль всего ствола скважины. Кроме того, данные с предлагаемых исследований могут позволить определить проницаемость рассматриваемых пород и подтвердить гидравлическую изолированность рассматриваемой структуры. В последствии скважина может быть использована для закачки и отбора природного газа в хранилище.

В то же время стоит отметить, что предлагаемые типы исследований могут быть проведены и в соляных шахтах с помощью оборудования, соединённого с поверхностью электрическим кабелем.

### **Заключение**

Предлагаемая методика оценки возможности строительства подземного хранилища природного газа, а также предлагаемые технологии для оценки геологических свойств рассматриваемых структур могут позволить повысить эффективность поиска оптимальных солевых образований небольшого объема для использования их в качестве подземного хранилища природного газа. В свою очередь это позволит более эффективно сглаживать неравномерность потребления на основных рынках использования природного газа. Таким образом, будет получен дополнительный стимул как для производителей, так и для потребителей природного газа в наращивании объемов торговли природным газом и его использования в современной экономике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Egging, R., Holz, F.: Risks in global gas markets: Investment, hedging and trade. Energy Policy Vol. 94, pp. 468–479. 2016.
2. Шилов, С.В. ООО «Газпром ПХГ»: опыт и перспективы деятельности / С.В. Шилов // Газовая промышленность. – 2015. – № 09 (727). – С. 16–18.
3. Goryl L. Triennium work reports june 2018: report of study group 2.1 UGS database. 27th world gas conference. Washington DC: International Gas Union; 2018.
4. Басарыгин, Ю.М. Теория и практика создания подземных хранилищ газа / Ю.М. Басарыгин, В.Д. Мавромати, А.Н. Черномашенко. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2012. – 518 с.
5. Ban Fansheng, Xiao Lizhi, Yuan Guangjie & Yang Changlai. Rapid solution mining technology for underground gas storage in salt-caverns and case histories. Nat Gas Ind 2012; 32(9).
6. Воробьев, А.Е. Инновационные технологии подземного хранения газа в выработанных газовых месторождениях / А.Е. Воробьев, В.П. Малюков. – М.: Российский университет дружбы народов, 2009. – 104 с. – ISBN 978-5-209-03055-3; [Электронный ресурс]. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=115726>.
7. Guo Kai, Li Jianjun & Zheng Xianbin. Interlayer treatment process in cavity building for salt-cavern gas storage a case study of Jintan Gas Storage of West-to-East Gas Pipeline. Oil Gas Storage Transport 2015; 34(2).
8. Васильев, В.А. Единый подход к расчету зоны дренирования скважинами различной конфигурации / В.А. Васильев, Т.А. Гунькина // Нефтепромысловое дело. – 2013. – № 4. – С. 5–8.
9. Гришин, Д.В. Конструкция забоя скважин подземных хранилищ газа / Д.В. Гришин, В.В. Вержбицкий, В.А. Васильев, Н.В. Никитина // Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. – Ставрополь: ООО «ТЭСЭРА», 2016. – С. 119–127.
10. Lu Zhengguang. Major progress in China's underground gas storage construction, obstacles and countermeasures. Sino-Global Energy 2016; 21(6).

**Goncharova Victoria Vladimirovna**

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: goncharova.vv@students.dvfu.ru

**Eroshkin Dmitry Vladimirovich**

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: eroshkin.dv@students.dvfu.ru

**Chemezov Il'ya Igorevich**

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: chemezov.ii@students.dvfu.ru

**Lechenko Gennady Evgenievich**

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: lechenko.ge@students.dvfu.ru

**Volkov Kirill Romanovich**

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: volkov.vk@students.dvfu.ru

**Masleev Alexander Vladimirovich**

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: masleev.av@students.dvfu.ru

## **New technologies for site selection and evaluation of salt structures for underground natural gas storage**

**Abstract.** Natural gas storage is an important element of the entire industry, as it helps to smooth out the uneven demand for natural gas associated with the seasonality of gas use for heating and energy generation. One of the most convenient types of gas storage is hydro-insulated salt caves. The presented article considers the issue of choosing the optimal salt caverns as potential natural gas storage facilities, based on hydrogeological analysis and the use of modern technologies for exploration of lithology of oil and gas fields. The presented work also examines the factors affecting the storage conditions of natural gas associated with the quality of raw materials. The work proposed the principles of choosing gas storage sites based on the analysis of geology and the state of the earth's surface, and also proposed a new technology for assessing the conditions for the construction of gas storage facilities in salt caverns. Applying the proposed principles, some salt mines in various regions with high natural gas consumption were analyzed. The conditions for the construction of natural gas storage facilities were assessed in the selected territories. Evaluation criteria were used, such as the type of structure, the depth of occurrence, the thickness of the salt layer, the NaCl content, the presence of shielding rocks, as well as the state of the earth's surface, the presence of water sources and the distance to operating gas transmission networks. Rock strength and salt solubility were also identified as important factors. The presented work can serve as a support in the preparation of projects for the construction of underground natural gas storage facilities both in our country and around the world. This area of research is especially relevant for regions with high imports of natural gas and high uneven consumption.

**Keywords:** underground storage; natural gas; uneven consumption; geological criteria; salt structures; reservoir thickness; salt content; well logging; porosity measurement