

Я. В. Фомина^{1,2}, Д. А. Новиков^{1,2}, А. Н. Никитенков³*

Перспективы реализации проектов CCS на территории Новосибирской области

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

³Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация
e-mail: Sadykovayv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Авторами предложена система критериев зонального прогноза гидрогеологических структур с целью реализации проектов по геологическому размещению углекислого газа в глубоких водоносных горизонтах. В систему оценки входят восемь групп критериев: общегидрогеологические, структурно-тектонические, литологические, гидродинамические, геотермические, гидрогеохимические, природоохранные и ресурсные. Целью исследования являлось проведение с помощью предложенной методики зонального прогноза перспектив реализации подобных проектов в верхнеюрском комплексе на севере Новосибирской области, выявление перспективных геологических структур и оценка потенциальной емкости ловушек для размещения углекислого газа. В результате была впервые проведена качественная и количественная оценка южных районов Западно-Сибирского артезианского бассейна с точки зрения пригодности для длительного хранения CO₂. Анализ особенностей строения региона по предложенным критериям позволил закартировать более 45 геологических структур с величиной минимальной начальной емкости под размещение CO₂ в сверхкритическом состоянии в размере от 0,8 до 129,5 млн т. каждая. Выполненный анализ позволяет перейти к стадии локальной оценки перспективных объектов для осуществления лицензирования и выделения структур в фонд потенциальных хранилищ углекислого газа.

Ключевые слова: проекты утилизации углекислого газа, технология CCS, методика выделения перспективных объектов, критерии, осадочные бассейны, Россия, Западно-Сибирский артезианский бассейн, Межовский нефтегазоносный район, север Новосибирской области

Ya. V. Fomina^{1,2}, D. A. Novikov^{1,2}, A. N. Nikitenkov³*

Prospects for the implementation of CCS projects in the Novosibirsk region

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
* e-mail: sadykovayv@ipgg.sbras.ru

Abstract. A system of the criteria for zonal forecast of geological structures is proposed for the purpose of implementation of the projects aimed at geological storage of carbon dioxide in deep aquifers. The evaluation system includes eight groups of criteria: general hydrogeological, structural-tectonic, lithological, hydrodynamic, geothermal, hydrogeochemical, environmental, and resource-related. The goal of investigation was the application of the proposed procedure to the zonal forecast of the potential to carry out the projects of this kind in the Upper Jurassic complex in the North of the

Novosibirsk Region, revelation of the promising geological structures, and evaluation of the potential capacity of traps for carbon dioxide storage. As a result, the qualitative and quantitative evaluation of the Southern regions of the West Siberian artesian basin was performed from the viewpoint of suitability for long-term storage of CO₂. Analysis of the features of regional structure over the proposed criteria allowed mapping more than 45 geological structures with the minimal initial capacity for CO₂ arrangement in the supercritical state in the amount of 0.8 to 129.5 mln t each. The results of analysis allow us to pass to the stage of local evaluation of the promising objects for licensing and for allocating the structures into the foundation of potential carbon dioxide storage facilities.

Keywords: carbon dioxide capture and storage projects, CCS technology, procedure for determining promising objects, criteria, sedimentary basins, Russia, West Siberian Artesian Basin, Mezhovskiy oil and gas bearing region, the North of the Novosibirsk Region

Введение

Размещение углекислого газа в глубоких водоносных горизонтах CCS (carbon capture and storage) к настоящему времени в мире стало одним из основных технологических решений для минимизации воздействия парниковых газов на окружающую среду. Для подземной утилизации парниковых газов, как правило, используются глубокозалегающие водоносные горизонты с высокоминерализованными пластовыми флюидами, которые не могут быть объектом питьевого и хозяйственного водоснабжения, и месторождения углеводородов, находящиеся на падающей стадии добычи [1-4].

По результатам проведенного ранее регионального прогноза перспектив территории РФ для реализации проектов CCS в Новосибирской области выявлены благоприятные условия для размещения больших объемов CO₂ [5]. Наличие литологически выдержанных водоносных горизонтов в интервале глубин от 800 до 3000 м, надежно изолированных от зоны активного водообмена региональным туронско-датским водоупором, отсутствие активной тектоники, широкое распространение структурных ловушек делают регион привлекательным объектом для реализации проектов долгосрочного хранения углекислого газа. Кроме того, в Новосибирской области большое число открытых ранее месторождений находятся на стадии падающей добычи, либо ловушки обладают незначительными объемами, нерентабельными для их разработки в текущих экономических условиях. Такие месторождения подходят для осуществления проектов CCS, поскольку водоносные горизонты изучены глубоким бурением и геофизическими методами, что позволяет существенно сократить расходы на детальное геологическое изучение и последующее проектирование полигонов. В этой связи, целью настоящего исследования являлось проведение зонального прогноза перспектив реализации проектов CCS в пределах оксфордского регионального резервуара на севере Новосибирской области, выявление перспективных геологических структур и оценка потенциальной емкости ловушек для размещения углекислого газа.

Методика

Методика оценки пригодности гидрогеологических бассейнов и их частей для реализации проектов CCS включает в себя три уровня детальности: регио-

нальный, зональный и локальный. Самый общий уровень – **региональный**, позволяет оценить территорию как благоприятную или неблагоприятную для реализации проектов в целом [5]. Второй уровень оценки перспектив территорий – **зональный**, на нем оцениваются части бассейнов, выделяются перспективные водоносные горизонты по площади и в разрезе. Выполняется численное математическое моделирование и дается экспертная оценка объемов возможной утилизации CO₂ в перспективных горизонтах. При **зональном** прогнозе наиболее значимыми являются восемь групп критериев: общегидрогеологические, структурно-тектонические, литологический, гидродинамические, геотермические, гидрогеохимические, природоохранные и ресурсные. Методика исследования подробно изложена в статье [6], далее все ключевые параметры будут оценены согласно выработанной системе критериев. Самый детальный уровень прогноза – **локальный**, на котором выполняется обоснование конкретных геологических структур для проектирования полигонов для размещения углекислого газа.

Результаты

Район исследования приурочен к южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна, в гидрогеологическом разрезе выделяется два этажа: нижний, относящийся к зоне затрудненного водообмена, и верхний – активного. В пределах нижнего водоносного этажа выделяется пять водоносных комплексов, надежно изолированных от зоны активного водообмена туронско-олигоценым региональным водоупором (сверху-вниз): апт-альб-сеноманский, неокомский, верхнеюрский, ниже-среднеюрский, палеозойский (совместно с триасовым). В верхней части разреза выделяется неогеново-четвертичный комплекс, входящий в зону активного водообмена.

Анализ геологического строения и гидрогеологических условий показал, что для целей реализации проектов CCS на территории Новосибирской области наилучшим образом подходит верхнеюрский водоносный комплекс, который является нефтегазоносным в регионе и наиболее детально изучен глубоким бурением и геофизическими методами. Комплекс представлен верхней подсвитой васюганской свиты (оксфордский региональный водоносный горизонт) и ее возрастными аналогами, сложенными терригенными породами с преобладанием песчаников с прослоями углей. Комплекс отделен от ниже-среднеюрского глинистыми породами нижней подсвиты васюганской свиты (келловейский водоупорный горизонт).

Общегидрогеологические и структурно-тектонические критерии. Согласно результатам тектонического районирования юрского структурного яруса, регион относится к южной части Западно-Сибирской геосинеклизы. Среди крупных тектонических элементов выделяются: (отрицательные) Колтогорско-Нюрольский желоб, осложненный Нюрольской мегавпадиной, и Кыштовский наклонный мезопргиб; (положительные) Межовский и Тебисско-Воробьевский структурные мегамысы, обособляющиеся в центральной и юго-западной частях региона. В юго-восточной части региона выделяется промежуточная тектоническая структура Внешнего пояса - Барабинско-Пихтовая моноклиза.

В рассматриваемом районе отсутствуют складчатые области и щиты, для верхнеюрского комплекса характерно преобладание пластовых гидрогеологических тел и терригенных коллекторов с поровым типом пустотного пространства. Анализ структурной карты по подошве баженовской свиты показал, что глубина ее залегания варьируется от 0 до -2800 м, при этом фиксируется общее погружение с юго-востока на северо-запад. Наименьшими глубинами от 0 до -2000 м характеризуются структуры обрамления Западно-Сибирского бассейна – Барабинско-Пихтовая мегамоноклиза, которая является внешней зоной питания подземных вод. В регионе выделяется большое количество структурных ловушек (рис. 1).

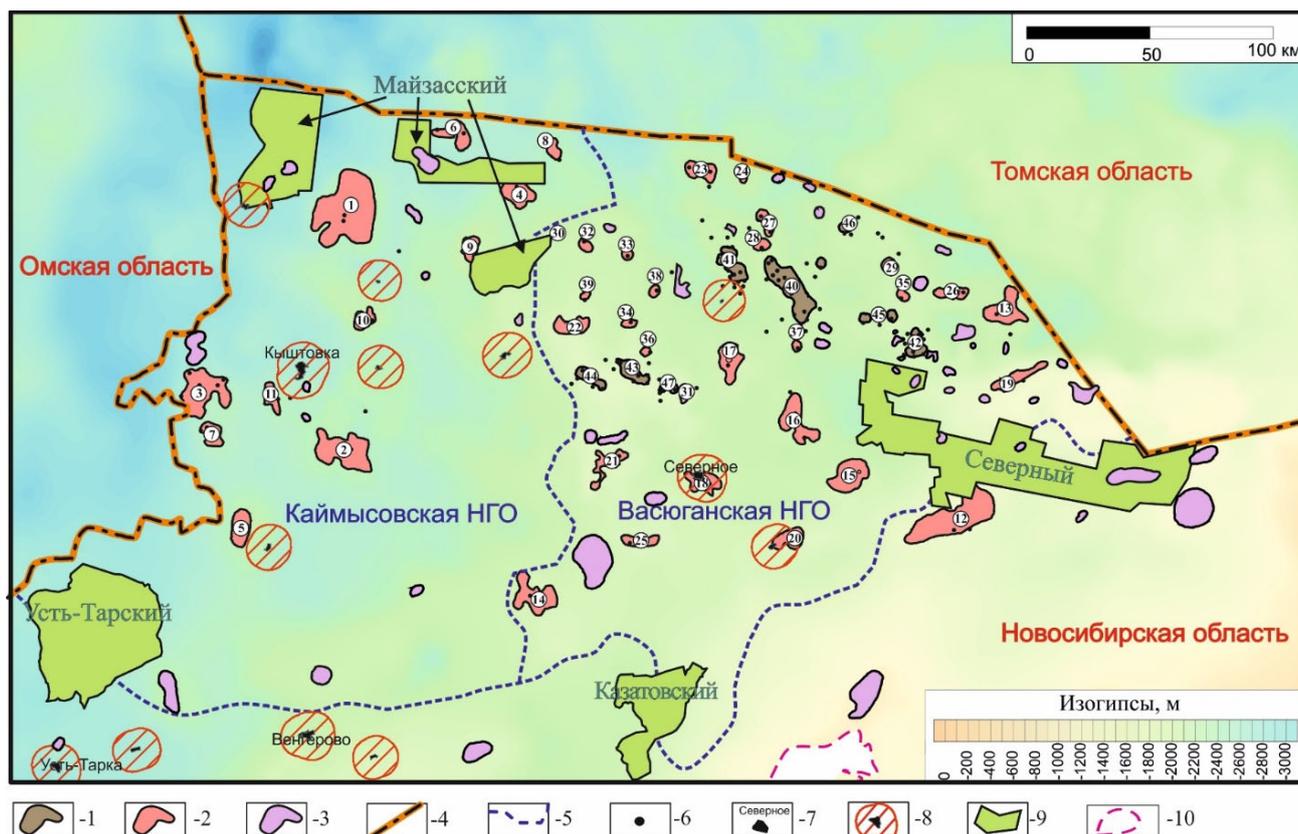


Рис. 1. Фонд перспективных структур верхнеюрского водоносного комплекса для реализации проектов ССС на территории Новосибирской области. Перспективные структуры: 1 – содержащие месторождения углеводородов, 2 – изученные глубоким бурением, 3 – не изученные бурением; Границы: 4 – административные, 5 – нефтегазоносных областей; 6 – глубокие скважины, 7 – крупны населенные пункты, 8 – буферные зоны с радиусом 5 км; Особо охраняемые природные территории: 9 – государственные природные заказники; 10- зоны отсутствия юрских отложений.

Литологические критерии. Детальное исследование керна васюганской свиты и их фильтрационно-емкостных свойств показало, что интервал с наилучшими коллекторскими свойствами включает отложения надугольной, межугольной и подугольной пачек верхней подсвиты васюганской свиты (горизонт Ю₁).

Коллектора представлены песчаниками и крупнозернистыми алевролитами с небольшими по мощности прослоями аргиллитов. Песчаники преимущественно средне- и мелкозернистые, реже крупнозернистые. Коллекторские свойства пород изменяются в широких пределах: $K_n = 2-32\%$ ($K_{n\text{ср}} = 15,2\%$), $K_{\text{пр}} = 0,2-329 \cdot 10^{-3} \text{мкм}^2$ ($K_{\text{прср}} = 25 \cdot 10^{-3} \text{мкм}^2$). Эффективные толщины варьируются в широком интервале: для надугольной пачки - от 4 до 20 м, для межугольной – от 1 до 16 м, для подугольной – от 1 до 8 м. Наибольшие толщины соотносятся с Северо-Межовской мегамоноклиной и Межовским структурным мегамысом.

Флюидоупором являются глинистые отложения георгиевской и баженовской свит, которые оцениваются как региональный высококачественный водоупорный горизонт, способный экранировать как природные, так и техногенные газовые залежи. Суммарная мощность глинистых отложений составляет 25-80 м. Наибольшие толщины характерны для зоны сочленения структур Внешнего пояса и Внутренней области Западно-Сибирской геосинеклизы.

Гидродинамические и геотермические критерии. Верхнеюрский комплекс приурочен к зоне застойного водообмена, для которой характерна высокая степень гидрогеологической закрытости недр. При формировании современной структуры гидродинамического поля доминирующую роль играл элизионный водообмен. Установлены два типа природных водонапорных систем: элизионная (литостатическая и термодегидратационная) во внутренних областях и инфильтрационная в пределах структур Барабинско-Пихтовской моноклинали [7].

Основной гидродинамической особенностью верхнеюрского гидрогеологического комплекса южных районов Обь-Иртышского междуречья является отсутствие аномально высоких пластовых давлений. Зона давлений 26 МПа трассирует контуры крупных отрицательных структур – Колтогорско-Нюрольского желоба, Нюрольской мегавпадины, Кыштовского наклонного мезопрогиба. Изобара 24 МПа характеризует крупные положительные структурные элементы. Промежуточные структурные элементы Внутренней области Западно-Сибирской геосинеклизы характеризуются разбросом пластовых давлений от 24 до 26 МПа. Давления менее 24 МПа выявлены в пределах Тебисско-Воробьевского и Межовского структурных мысов и Северо-Межовской мегамоноклинали. Барабинско-Пихтовая мегамоноклиза характеризуется давлениями меньше 20 Мпа [7, 8]. Таким образом, в пределах верхнеюрского комплекса повсеместно существуют благоприятные термобарические условия для размещения углекислого газа в сверхкритическом состоянии.

Анализ геотермических особенностей показал, что для верхнеюрского комплекса характерен разброс температур от 66 до 105°C. Фоновое значение пластовых температур составляет 90-95°C. Характерной особенностью является региональное уменьшение теплового потока в юго-восточном направлении, по мере приближения к структурам Внешнего пояса Западно-Сибирской геосинеклизы. Зоны повышенных температур протягиваются полосой с юго-запада на северо-восток территории исследования, трассируют контуры отрицательных тектонических структур — Колтогорско-Нюрольского желоба, Нюрольской мегавпадины, Кыштовского наклонного мезопрогиба. Пониженные

значения пластовых температур (меньше 80°C) характерны для положительных и промежуточных структурных элементов всех порядков. Пониженные температуры выявлены в пределах Тебисско-Воробьевского и Межовского структурных мысов и Северо-Межовской мегамоноклинали. Самыми низкими температурами характеризуется структура внешнего пояса Западно-Сибирской геосинеклизы – Барабинско-Пихтовая мегамоноклиза [9].

Гидрогеохимические критерии. Анализ состава подземных вод показал, что верхнеюрский комплекс характеризуется распространением вод от солоноватых до рассолов преимущественно хлоридного натриевого типа с минерализацией от 1,6 до 55 г/дм³. Фоновыми являются воды с минерализацией 20 г/дм³. Содержание (г/дм³) Na⁺+K⁺ составляет от 0,4 до 17,5 при среднем 7,9, Cl⁻ – от 0,15 до 34,3 (12,9). Среднее содержание Mg²⁺ составляет – 0,11, Ca²⁺ – 0,68, HCO₃⁻ – 1,05. Средние содержания микрокомпонентов (мг/дм³) в пластовых водах верхнеюрского комплекса составляют: I – 7,64, Br – 67,4, B – 11,35, NH₄ – 56,9 Во всех химических типах подземных вод распределение основных солеобразующих макро- и микрокомпонентов напрямую зависят от величины их солёности. Установлено, что для большей части территории характерен прямой тип вертикальной гидрогеохимической зональности. На ряде площадей (Сергеевская, Бочкаревская и др.) развит инверсионный тип гидрогеохимической зональности. Основными источниками маломинерализованных вод в верхнеюрском комплексе считаются литогенные (дегидратационные) и конденсатогенные воды [10].

Таким образом, средняя минерализация подземных вод – 20 г/дм³, преобладающий хлоридный натриевый состав и отсутствие эксплуатации водоносного горизонта для питьевого и технического водоснабжения позволяет рассматривать его в качестве потенциального объекта для утилизации углекислого газа. Необходимые буферные водоносные горизонты широко развиты в гидрогеологическом разрезе, а наличие туронско-олигоценового регионального флюидоупора толщиной до 600 м надежно экранирует нижний водоносный этаж от процессов инфильтрации и восходящей миграции солёных вод в зону активного водообмена.

Природоохранные и ресурсные. Согласно перечню особо охраняемых природных территорий РФ (ООПТ), в исследуемом регионе выделяются четыре крупных государственных природных заказника, которые имеют биологический и зоологический профиль и региональный статус. Три крупных участка Майзасского заказника обособляются на севере исследуемого региона и занимают площадь 91943 га. Заказник ограничивает незначительно площади Верхнечековской, Пустоваловской и Чековской перспективных структур. На востоке региона выделяется Северный государственный природный заказник площадью 102 739 га. Заказник частично ограничивает площадь Тенисской перспективной структуры. На юге расположен Казатовский природный заказник площадью 37 550 га. Природный заказник не вносит ограничений ни в одну выявленную перспективную структуру. На западе выделяется Усть-Тарский заказник площадью 90405 га., ограничений в распределение перспективных структур заказник не вносит. Таким образом, существующие заказники вносят незначительные коррективы в Верхнечековскую, Пустоваловскую, Чековскую и Тенисскую перспективные площади.

Согласно данным нефтегазогеологического районирования район исследования относится к Нюрольско-Колтогорскому нефтегазоносному району Каймысовской нефтегазоносной области и Межовскому нефтегазоносному району Васюганской нефтегазоносной области. Месторождения углеводородов установлены только в Межовском районе. На территории севера Новосибирской области в верхнеюрских отложениях выявлено 8 нефтяных и одна газоконденсатная залежи. Большая часть открытых залежей относится к категории мелких по запасам. Все существующие месторождения либо находятся в стадии падающей добычи, либо имеют мелкие залежи, добыча которых в настоящее время нерентабельна. Закачка углекислого газа в оксфордский региональный горизонт этих месторождений может быть рекомендована в качестве метода интенсификации добычи остаточной нефти. Самым крупным являются Верх-Тарское нефтяное месторождение, разработка которого завершается в настоящее время.

Таким образом, проведенные исследования позволили обосновать фонд перспективных структур в границах оксфордского регионального резервуара для реализации проектов CCS на территории Новосибирской области. Всего было закартировано 47 перспективных площадей, на которых ранее было проведено глубокое бурение и порядка 50 перспективных структур, не изученных глубоким бурением, тем не менее обладающих хорошими перспективами (рис. 1). Всего было выделено 11 площадей в пределах Нюрольско-Колтогорского района Каймысовской нефтегазоносной области и 36 перспективных объектов, в том числе 8 структур с выявленными залежами углеводородов в верхнеюрском комплексе в границах Межовского района Васюганской нефтегазоносной области. Расчет возможных объемов закачки осуществлялся в программном комплексе Hydro-Geo. Расчет потенциальных объемов выделенных структур показал, что наибольшей емкостью характеризуются Бочкаревская, Тенисская и Верхнечековская структуры, которые способны вместить по минимальным расчетам от 78 до 130 млн т углекислого газа каждая. Суммарная минимальная емкость закартированных объектов, изученных бурением, составляет 1092,3 млн т углекислого газа.

Заключение

Наиболее перспективным для реализации проектов CCS в северных районах Новосибирской области является оксфордский региональный водоносный горизонт, выделяемый в верхнеюрском водоносном комплексе. Горизонт приурочен к зоне застойного водообмена, характеризуется песчано-глинисто-углистым составом и пористостью до 20 %. В горизонте преобладают подземные воды хлоридного натриевого состава со средней минерализацией около 20 г/дм³. Целевой горизонт характеризуется преимущественно элизионным водообменом, не используется для питьевых, бальнеологических и технических целей, и надежно изолирован региональным туронско-олигоценым водоупорным горизонтом от зоны активного водообмена. Кроме того, выделяются многочисленные буферные горизонты в меловых и кайнозойских отложениях. В кровле верхнеюрского комплекса отсутствуют зоны с аномально-высокими пластовыми давлениями, в целом они близки к гидростатическим и колеблются от 20 до 26 МПа. Пластовые температуры изменяются от 66 до 105°С, возрастая в северо-восточном направ-

лении. Термобарические условия благоприятны для размещения углекислого газа в сверхкритическом состоянии.

Был выделен фонд перспективных структур для реализации проектов CCS на территории Новосибирской области, всего было оконтурено 47 перспективных площадей, суммарная минимальная емкость которых составляет 1092,3 млн т углекислого газа. Существующие природоохранные критерии не вносят значимых ограничений для реализации проектов CCS на севере Новосибирской области. Верх-Тарское нефтяное месторождение, находящее на стадии падающей добычи, может быть рекомендовано для размещения углекислого газа в горизонт Ю₁ в качестве метода дополнительно интенсификации добычи остаточных углеводородов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014, Новосибирского государственного университета по программе Приоритет-2030.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aminu M.D., Nabavi S.A., Rochelle C.A. Manovic V. A review of developments in carbon dioxide storage // *Applied Energy*. – 2017. – V. 208. – Pp. 1389-1419. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.015>
2. Bachu S., Bonijoly D., Bradshaw J., Burruss R., Holloway S., Christensen N.P., Mathiassen O.M. CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps // *Green house Gas Control*. –2007. – Is.1. –Pp. 430-443. – [https://doi.org/10.1016/S1750-5836\(07\)00086-2](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00086-2)
3. Shukla R, Ranjith P, Haque A, Choi X. A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity // *Fuel*. – 2010. – V. 89. – Is. 10. – Pp. 2651-2664. – <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.012>
4. Tang Y, Yang R, Bian X. A review of CO₂ sequestration projects and application in China // *The Scientific World Journal*. –2014. –N 381854. –<https://doi.org/10.1155/2014/381854>.
5. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Юрчик И.И., Садыкова Я.В., Деркачев А.С., Черных А.В., Максимова А.А., Головин С.В., Главнов Н.Г., Жуковская Е.А. Региональный прогноз перспектив захоронения углекислого газа на территории Российской Федерации // *Нефтяное хозяйство*. –2022. – № 3. – С.36-42. – <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-3-36-42>.
6. Новиков Д.А., Фомина Я.В., Юрчик И.И., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Головин С.В. Оптимальный комплекс критериев зонального прогноза перспектив захоронения углекислого газа в геологических формациях // *Экология и промышленность России*. – 2023. – Т. 27. – № 4. – С.44-49. – <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-44-49>
7. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В., Рыжкова С.В. Гидродинамические особенности нефтегазоносных отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья // *Георесурсы*. – 2019. – Т. 21. – № 4. – С. 85-94.
8. Садыкова Я.В. (2014) Палеогидродинамические реконструкции верхнеюрских отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2014. – № 1. – С. 54-60.
9. Новиков Д.А., Рыжкова С.В., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. О геотермической зональности нефтегазоносных отложений северо-западных районов Новосибирской области // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. – 2018. – № 5. – С. 69-76.
10. Садыкова Я.В. Гидрогеохимия нефтегазоносных отложений южной части Обь-Иртышского междуречья (Западная Сибирь) // *Геология нефти и газа*. – 2013. – № 6. – С. 75-83.

© Я. В. Фомина, Д. А. Новиков, А. Н. Никитенков, 2023