

И. И. Юрчик^{1,2}, Д. А. Новиков^{1,2*}, Р. В. Жарков³*

О возможности реализации проектов CCS в пределах Сусунайского межгорного артезианского бассейна (о. Сахалин)

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

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
г. Южно-Сахалинск, Российская Федерация

* e-mail: YurchikII@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе рассмотрены геолого-гидрогеологические условия участка, расположенного на юге острова Сахалин (Сусунайский межгорный артезианский бассейн) для оценки возможности реализации проектов CCS. Установлено, что на региональном и зональном уровне критериев изученную территорию можно отнести к бесперспективным. Реализация полигонов CCS столкнется с большими геологическими рисками, связанными с высокой вероятностью утечки CO₂ в водоносные горизонты, используемые для питьевого водоснабжения населения.

Ключевые слова: проекты утилизации углекислого газа, проекты CCS, критерии, геологическое хранение CO₂, остров Сахалин

I. I. Yurchik^{1,2}, D. A. Novikov^{1,2}, R. V. Zharkov³*

The possibility of implementing CCS projects within the Susunai intermountain artesian basin (Sakhalin Island)

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

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

* e-mail: YurchikII@ipgg.sbras.ru

Abstract. The geological and hydrogeological conditions of the site located in the south of Sakhalin Island (Susunai intermountain artesian basin) were considered to assess the possibility of implementing CCS projects. It has been established that at the regional and zonal level of criteria, the studied territory can be classified as unpromising. The implementation of CCS landfills will face great geological risks associated with a high probability of CO₂ leakage into aquifers used for drinking water supply to the population.

Keywords: carbon dioxide utilization projects, CCS projects, criteria, geological storage of CO₂, Sakhalin Island

Введение

На протяжении нескольких лет остров Сахалин широко обсуждается в средствах массовой информации, на корпоративном и правительственном уровне для широкого внедрения технологии по размещению углекислого газа в глубоких водоносных горизонтах CCS (carbon capture and storage). О своих намерениях широко заявили ПАО «Роснефть», АО «Русатом Оверсиз» (дочерняя структура Госкорпорации «Росатом») и ПАО «Газпром нефть». Причем сотрудничество «Русатом

Оверсиз» и ПАО «Газпром нефть» связано с реализацией амбициозных планов, где CCS станет составной частью комплексной технологии производства водорода методом конверсии метана с улавливанием и захоронением CO₂ [9]. Отдельного внимания заслуживают заявления ООО «Газпромнефть НТЦ», о том, что «...Геологическая перспективность Сахалина, Приморского и Хабаровского краев в совокупности с существующей портовой инфраструктурой и логистической близостью эмитентов из стран АТР создают предпосылки к проработке CCS проектов с морской составляющей транспорта CO₂» [5]. В этой связи, настоящей работой мы начинаем обнародование исследований, связанных с оценкой геолого-гидрогеологических критериев реализации проектов CCS на острове Сахалин.

Методика

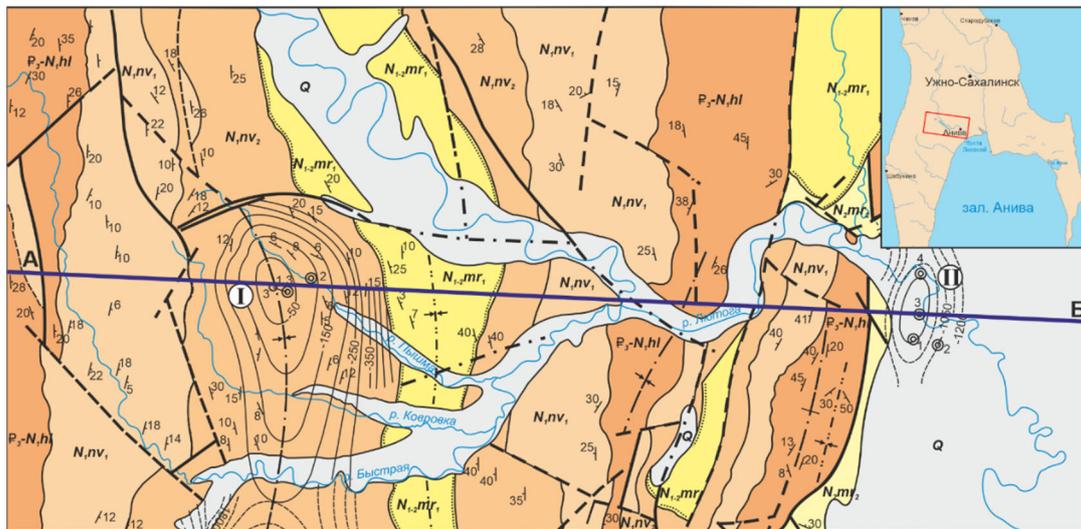
Оценка возможности реализации проектов CCS в пределах южной части острова Сахалин (юг Сусунайского межгорного артезианского бассейна) выполнена в соответствии с предложенной методикой [6-7].

Результаты и их обсуждение

Рассматриваемая территория расположена на юге острова Сахалин (рис. 1), имеет сложное геолого-тектоническое строение, обусловленное его расположением в составе Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода от континента к океану, являющейся крупнейшей межблоковой («шовной») структурой глобального уровня в районе интенсивной разрядки глубинной энергии, активной позднемезозойско-кайнозойской и современной геодинамики [10]. В тектоническом плане рассматриваемый район расположен в зоне сочленения Анивского и Чеховского прогибов, границей между которыми служит Центрально-Сахалинский разлом. С юга к ним примыкает Крильонское поднятие, на севере их разделяет Камышовская моноклинали.

Фундамент бассейна слагают триас-юрские и раннемеловые метаморфические и метаморфизованные кремнистые вулканогенно-терригенные породы. Отложения толщ и свит, слагающих фундамент, не вскрыты глубоким бурением и изучены только по их выходам на дневную поверхность в горно-складчатом обрамлении Сусунайской низменности [3, 4].

В осадочном выполнении выделяют два структурных этажа: нижний и верхний [14]. Нижний представлен морскими терригенными и вулканогенно-терригенными отложениями палеоцена и верхнего мела (краснояровская, синегорская свиты). Верхний структурный этаж, выполнен отложениями кайнозойского возраста, которые подразделяются на три яруса. Нижний ярус – эоцен-миоценовый, сложенный вулканогенно-терригенными морскими отложениями, мелководными в низах разреза (тунайчинская и аракайская свиты) и умеренно глубоководными в основном объёме (холмская и невелинская свиты). Средний ярус – миоцен-плиоценовый – включает в себя нижнемаруямские отложения. Залегают на подстилающем ярусе с ярко выраженным несогласием и характеризуется заметным проявлением пликвативно-разрывной тектоники как предшествовавшей формированию среднего яруса, так и сопутствующей его формированию. Верхний ярус сложен прибрежно-морскими и субконтинентальными верхнемаруямскими отложениями, залегающими с элементами размыва на поверхности нижнемаруямской подсвиты.



Геологический разрез по линии А-В

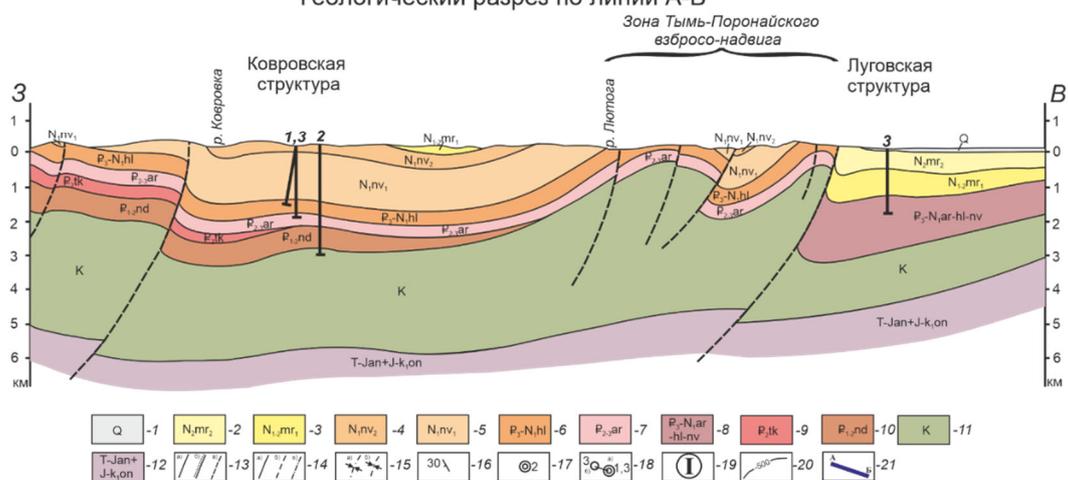


Рис. 1. Геологическая карта и разрез [12]. Условные обозначения: 1 – нерасчлененные четвертичные отложения; 2 – маруямская свита, верхняя подсвита; 3 – маруямская свита, нижняя подсвита; 4 – невелинская свита, верхняя подсвита; 5 – невелинская свита, нижняя подсвита; 6 – холмская свита; 7 – аракайская свита; 8 – нерасчлененные отложения аракайской, холмской и невелинской свит (на разрезе); 9 – такарадайская свита (на разрезе); 10 – нижнедуйская свита (на разрезе); 11 – нерасчлененные меловые отложения (на разрезе); 12 – нерасчлененные отложения анненской и онежской толщ; 13 – геологические границы: а) согласованные, б) несогласованные, в) предполагаемые; 14 – разрывные нарушения: а) достоверные, б) предполагаемые, в) под четвертичными отложениями; 15 – оси складок: а) антиклинальных, б) синклинальных; 16 – элементы залегания пород; 17 – поисковые скважины; 18 – поисковые скважины вертикальная и наклонная, пробуренные с одной точки: а) общее устье, номер скважины, б) положение в плане забоя наклонной скважины, ее номер; 19 – площади: I – Ковровская, II – Луговская; 20 – изогипсы складок: Ковровская – по электрореперу в подошве верхне-невелинской подсвиты, Луговская – по условному сейсмическому горизонту в средней части нижнемаруямской подсвиты; 21 – линия геологического разреза.

В соответствии с картой гидрогеологического районирования Российской Федерации масштаба 1:2 500 000 под редакцией Г.С. Вартапяна и М.В. Кочеткова составленной в 2001 году, остров Сахалин относится к Сахалинской гидрогеологической складчатой области (ГСО) 1-го порядка. Рассматриваемая территория располагается на границе двух структур 2-го порядка: Тонино-Сахалинской ГСО и Сахалинского артезианского бассейна (АБ) (рис. 2). В составе Тонино-Сахалинской ГСО на рассматриваемом участке выделяются: Татарский предгорный артезианский бассейн (ПАБ) 3-го порядка, Лютогский межгорный артезианский бассейн (МАБ) 4-го порядка и Камышовская ГСО 4-го порядка. В составе Сахалинского АБ выделяется Сусунайский МАБ 4-го порядка.

Согласно [6] гидрогеологические складчатые области и предгорные артезианские бассейны, в силу своего геолого-гидрогеологического строения, не могут рассматриваться как области перспективные для геологического размещения CO₂, что наглядно подтверждается геологическим разрезом (см. рис. 1) рассматриваемой территории, поэтому ниже будет рассмотрено гидрогеологическое строение Лютогского и Сусунайского межгорных артезианских бассейнов.

С гидродинамической точки зрения, в соответствии с [8], в разрезе рассматриваемой территории выделяются зоны свободного, затрудненного и весьма затрудненного водообмена, которым по [11] соответствуют зоны инфильтрационного, преимущественно инфильтрационного и элизионного типов водообмена, что позволяет выделить два гидрогеологических этажа, разделенных региональным выдержанным флюидоупором нижнемиоценового возраста.

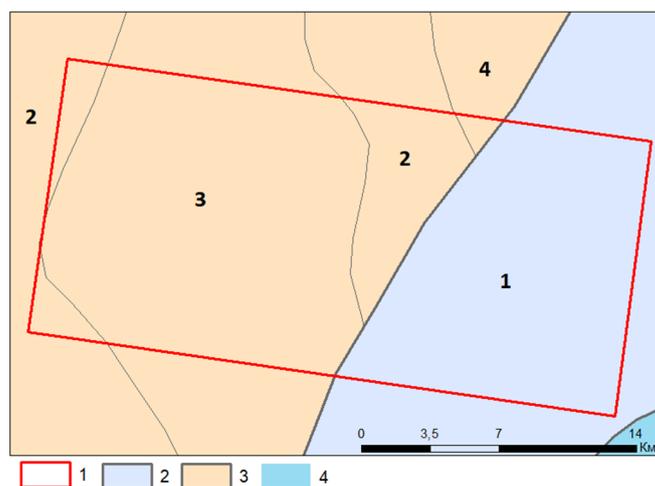


Рис. 2. Гидрогеологическое районирование территории исследований (согласно [4]).

Условные обозначения: 1 – территория исследований, 2 – Сахалинский артезианский бассейн 2-го порядка 3 – Тонино-Сахалинская гидрогеологическая складчатая область 2-го порядка, 4 – залив Анива;
 Цифрами на карте: 1 – Сусунайский межгорный артезианский бассейн 4-го порядка, 2 – Татарский предгорный артезианский бассейн 3-го порядка, 3 – Лютогский межгорный артезианский бассейн 4-го порядка, 4 – Камышовская гидрогеологическая складчатая область 4-го порядка.

В Сусунайком МАБ к верхнему этажу относятся два водоносных комплекса (ВК) (сверху вниз): *плиоцен-четвертичный ВК*, представленный верхнемаруямской подсвитой и образующими с ней непрерывный разрез четвертичными отложениями. ВК представлен субконтинентальными лагунными, озерно-аллювиальными, озерными и аллювиально-пролювиальными осадками, представленными не литифицированными, слегка уплотненными песками, гравийниками, галечниками с прослоями алевритов, редкими прослоями и линзами глин и лигнитов [12]. ВК относится к зоне активного водообмена, не имеет выдержанных и надежных флюидоупоров, промыт инфильтрационными водами, служит мощным резервуаром пресных и слабосоленых вод, являющихся источником хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения населения. Глинистое основание верхнемаруямской подсвиты служит флюидоупором отделяющим плиоцен-четвертичный ВК от нижележащего и покрывкой для газовых залежей верхних горизонтов-коллекторов нижнемаруямской подсвиты. Мощность комплекса достигает 800-1000 м. *Верхнемиоценовый ВК*, представлен нижнемаруямской подсвитой, сложенной мелководно-морской неотчетливо грубослоистой толщей глинистых, неотсортированных, мелкозернистых слабо литифицированных песчаников, песков, алевролитов-алевритов, аргиллитов, глин. В разрезе ВК выделяют до 13 продуктивных горизонтов, выделенных на основе разреза Восточно-Луговского месторождения. Мощности пластов-коллекторов составляют от 5-15 до 80-100 м. Как правило, пласты имеют сложное строение, подразделяясь на ряд пропластков и не всегда прослеживаются во всем разрезе Сусунайского бассейна [14]. Петрологические и петрофизические исследования нижнемаруямских газопродуктивных горизонтов, проведенные по материалам поисково-разведочного бурения [13], выявляют весьма низкую степень их литификации и присутствие в них значительного количества гидрослюдистых (иллит) и монтмориллонитовых (сметтит) глин, сильно разбухающих в водной среде. В гидродинамическом отношении комплекс представляет водонапорную систему преимущественно инфильтрационного типа [11], движение вод происходит с северо-запада от области питания (Тымь-Поронайского регионального взброса) на юго-восток к области разгрузки (шельфа Анивского залива). ВК содержит гидрокарбонатные натриевые и хлоридные кальциевые умеренно соленые и слабосоленые подземные воды с минерализацией от 9 до 22 г/дм³. Уменьшение минерализации происходит в сторону области питания и в пластах с лучшими фильтрационно-емкостными свойствами, вероятно, приуроченным к более промытым частям разреза. Мощность ВК на Луговской площади достигает до 760 м.

К нижнему гидрогеологическому этажу в разрезе Сусунайского МАБ относятся два ВК. *Эоцен-нижнемиоценовый ВК* приурочен к отложениям тунанчинской, аракайской, холмской и невелинской свит. Верхняя, большая часть комплекса (невелинская холмской и частично аракайская свиты) сложена алевролитами и аргиллитами, туфоалевролитами с подчиненными прослоями туфопесчаников или псаммитовых туффитов (более 1000 м), которые являются региональным флюидоупором. В нижней части разреза выделяется базальный горизонт (тунанчинская свита) с высокими фильтрационными свойствами: пористостью

насыщения от 19,3 до 24,3 % и весьма высокой газопроницаемостью – до 0,449 мкм², при относительно низкой остаточной водонасыщенности (30-50%) [14], который и является основным водоносным горизонтом. Комплекс слабо изучен глубоким бурением, по имеющимся данным единичных испытаний содержит хлоридные кальциевые и гидрокарбонатные натриевые слабосоленые подземные воды с минерализацией 12-17 г/дм³, характеризуется наличием АВПД. Областью разгрузки ВК служит зона Тымь-Поронайского регионального взброса [11]. Самый нижний *верхнемеловой ВК* практически не изучен. Частично вскрытые отложения комплекса испытаны на Восточно-Луговской площади, где обнаружены достаточно хорошие фильтрационно-емкостные свойства пород и зафиксированы АВПД, превышающие гидростатическое на 11 МПа. Возможно данный комплекс гидродинамически сообщается с вышележащим [11].

Гидрогеологический разрез Лютогского МАБ, в нижней своей части (нижний гидрогеологический этаж) имеет схожее строение с вышеописанным Сусунайским МАБ. Различия имеются лишь в верхнем гидрогеологическом этаже. Здесь выделяется *миоцен-четвертичный ВК*, в составе которого установлены слабонапорные, промытые инфильтрационными водами горизонты пресных и солоноватых вод. Минерализация подземных вод с глубиной незначительно возрастает до 2-3 г/дм³. Водовмещающими отложениями является вулканогенно-осадочная толща невеличской свиты и большей частью размытые мелководно-морские отложения (островки) нижнемаруямской свиты.

Заключение

Вышеописанные геологические и гидрогеологические условия рассматриваемой территории с учетом разработанных критериев зонального прогноза [7] позволяют рассматривать в первом приближении в качестве перспективных объектов для размещения СО₂ лишь верхнемиоценовый ВК Сусунайского МАБ однако отсутствие буферного горизонта с двумя надежными регионально выдержанными флюидоупорами, отделяющими данный ВК от плиоцен-четвертичного ВК, используемого для хозяйственно-питьевого водоснабжения, делает его бесперспективным.

Кроме того, необходимо учитывать расположение рассматриваемой территории в зоне активизации современных неотектонических процессов. В соответствии с картами общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97-А), район исследований относится к восьмибальной зоне. В зависимости от геологических, гидрогеологических условий отдельных участков территорий восьмибальной зоны сейсмичность их может быть уточнена в сторону уменьшения или увеличения на 1 балл. Для большей части Сусунайской низменности и низких морских террас, долин рек, характеризующихся близким залеганием грунтовых вод и наличием слабых грунтов, сейсмичность может увеличиваться до 9 баллов, для горных районов она может уменьшаться до 7 баллов.

При этом, согласно ISO 27916 [1] наличие сейсмичности само по себе не должно препятствовать пригодности площадки для хранения СО₂, если проектирование объектов и планируемые операции соответствуют стандартам сейсмо-

стойкости, следует учитывать, что это приведет к значительному удорожанию проекта.

Как уже указывалось выше, западный борт Анивского прогиба контролируется Центрально-Сахалинским активным разломом [2], осложненным более мелкими разломами. Все они, с учетом современной неотектоники, являются потенциальными зонами утечки CO₂ и требуют тщательного предварительного изучения тектонических напряжений, геодинамического моделирования возможного развития процессов с учетом планируемых объемов закачки и роста пластовых давлений, а также обязательного дополнительного мониторинга зон разломов, что опять же приведет к значительному удорожанию возможных проектов ССС.

Экономическая целесообразность реализации возможных проектов ССС в изучаемом регионе определяется огромными геологическими рисками при их реализации, связанными с вышеуказанными доводами, а также отсутствием крупных ловушек для длительного производственного цикла ССС.

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. ISO 27916, Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Carbon dioxide storage using enhanced oil recovery (CO₂-EOR). – Switzerland, 2019. – 64 p.
2. Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У., Сергеев К.Ф., Стрельцов М.И., Кожурин А.И., Бесстрашнов В.М., Стром А.Л., Сузуки Я., Цуцуми Х., Ватанабе М., Уеки Т., Шимамото Т., Окумура К., Гото Х., Кария Я. Активные разломы северо-восточного Сахалина // Геотектоника. – 2002. – № 3. – С. 66-68.
3. Гладенков Ю.Б., Баженова О.К., Гречин В.И., Маргулис Л.С., Сальников Б.А. Кайназой сахалина и его нефтегазоносность. – М.: ГЕОС, 2002. – 225 с.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. (Изд. 2-е. серия Сахалинская. Листы L-54X, XI (Луговое), L54-XII (Охотское), L-54-XVI, XXII (Шебунино), L-54-XVII, XXIII (Корсаково), L-54-XVIII (Озерская). Объяснительная записка. – СПб.: Изд-во СПб картографии ВСЕГЕИ, 2001. – 276 с.
5. Купцов Н.В. Перспективы создания портовых терминалов CO₂ с целью сокращения промышленных выбросов [Электронный ресурс] // Морские порты. – 2022. – № 1. – URL: <http://morvesti.ru/analitika/1688/95059/>
6. 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.
7. 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.
8. Равдоникас О.В. Нефтепоисковая гидрогеология Сахалина. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. – 168 с.
9. Технологии улавливания, полезного использования и хранения двуокиси углерода (CCUS). – М.: Scoltech, 2022. – 79 с.

10. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. – М.: Научный мир, 2010. – 276 с.
11. Юрочко А.И., Свитенко В.С., Борисов Б.Д. Влияние гидродинамических условий на размещение скоплений газа в Анивском прогибе Южного Сахалина // Геология и геофизика. – 1982. – № 12. – С.37-41.
12. Мотовилов Ю.В., Шепелев А.С., Шапошников А.В., Тютрин И.И. «Отчет по теме: Анализ геолого-геофизической приразломной зоны по площадям, выведенным из глубокого бурения с отрицательным результатом». – Южно-Сахалинск, 1989.
13. Оксенгорн Ф.С., Губанов А.А. и др. «Отчёт о результатах поисково-разведочного бурения на Анивской группе перспективных структур в 1999-2001 гг. в Анивском районе Сахалинской области (с подсчётом запасов природного газа по Благовещенскому, Заречному и пересчётом запасов газа по Южно-Луговскому месторождениям на 01.01.2002г.)», 2003.
14. Оксенгорн Ф.С., Марышев Л.К. «Отчет о результатах сейсморазведочных работ на Южно-Анивской площади, проведённых в Анивском районе в 2002-2004 годах». – Южно-Сахалинск, 2004.

© И. И. Юрчик, Д. А. Новиков, Р. В. Жарков, 2023