НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ БАССЕЙНОВ

Оригинальная статья
УДК 551.247
EDN: RFTZYS

Современное состояние изученности соляной тектоники в осадочных бассейнах мира в контексте перспектив их нефтегазоносности

А.К. Юмашева ✉, М.П. Антипов
Институт проблем нефти и газа РАН, Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3

Аннотация. *Введение.* В последние годы вопросы, связанные с влиянием соляной тектоники на аккумуляционные и экранирующие свойства галогенных покровов, характеризуются различной степенью изученности. Для формирования целостного представления о текущем состоянии исследований в этой области целесообразно проведение библиометрического анализа, который позволяет выявлять современные тренды развития научно-практического знания. *Цель работы.* Комплексный анализ современного состояния изученности в области соляной тектоники как геологического процесса, определяющего формирование галогенных структур в нефтегазоносных бассейнах. Работа направлена на выявление ключевых тенденций развития направления и определение перспективных направлений изучения процессов формирования дисгармоничных галогенных структур для российской науки. *Материалы и методы.* На основе данных OpenAlex за период 1910–2025 гг. методами анализа соупотребления ключевых слов и географического анализа рассмотрен глобальный ландшафт научных работ по соляной тектонике для выявления тематической структуры, динамики и распределения публикаций среди стран. *Результаты.* Выделено четыре тематических кластера: углеводородный, геохимический, технологический и флюидный. Зафиксирован рост количества работ по водородной тематике в 2022–2024 гг., что отражает трансформацию роли соляных структур от ловушек углеводородов к элементам энергетической инфраструктуры. Установлено, что лидирующие позиции по публикационной активности занимают США, Китай и страны Западной Европы, что обусловлено комплексом факторов, таких как степень освоения нефтегазовых ресурсов в солеродных провинциях и концентрация исторически сформировавшихся научно-исследовательских центров. Хотя Россия входит в десятку лидеров, ее позиции не отражают реального геологического потенциала солеродных бассейнов из-за низкой международной видимости русскоязычных публикаций. *Заключение.* Для преодоления разрыва между геологической изученностью российских бассейнов и их международной цитируемостью необходим переход к англоязычным публикациям в журналах Q1/Q2, создание открытых баз эталонных разрезов и интеграция методов искусственного интеллекта и геофлюидодинамического моделирования.

Ключевые слова: соляная тектоника; осадочные бассейны; библиометрический анализ; тематическая кластеризация; углеводороды; хранение водорода; OpenAlex

✉ Юмашева Анастасия Константиновна, yumasheva@ipng.ru
© Юмашева А.К., Антипов М.П., 2026
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Финансирование: статья написана в рамках государственного задания ИПНГ РАН (тема № 125020501406-8).

Для цитирования: *Юмашева А.К., Антипов М.П.* Современное состояние изученности соляной тектоники в осадочных бассейнах мира в контексте перспектив их нефтегазоносности // Актуальные проблемы нефти и газа. 2026. Т. 17, № 3. С. 395–414. EDN: RFTZYS

Введение

Соляная тектоника остается одним из определяющих факторов условий формирования углеводородных систем, создания структурных и литологических ловушек, контроля миграционных путей и термальной истории бассейнов. Понимание механизмов движения солей имеет ключевое значение для разработки эффективных технологий освоения ресурсов углеводородов, оценки рисков природных катастроф и решения экологических проблем нефтегазоносных территорий. Проведение библиометрического анализа позволяет оценить состояние исследований, выявить существующие пробелы и предложить направления дальнейших разработок. За последние 20 лет наблюдается переход от описательных структурных схем к количественным геомеханическим и геофлюидодинамическим моделям.

Изучение процессов соляной тектоники – не новый раздел в геологии, так как эта область во всем мире исследуется более 100 лет. На графике (рис. 1) распределения опубликованных материалов по годам на основе базы данных OpenAlex[1] выделяются 3 этапа развития направления.

Первый этап (1910–1950 гг.) характеризовался ограниченным количеством исследований из-за отсутствия качественных данных о глубинном строении недр несмотря на первые описания диапиризма, появившиеся еще в конце XIX века. Тем не менее, случайное обнаружение крупных запасов каменной соли на Авери-Айленд и открытие месторождения Дженнингс (1901 г.) в соляном куполе Мексиканского залива заложили фундамент для изучения солеродных бассейнов и связи галогенных структур с нефтегазоносностью [1–3].

Во второй этап, в период с 1950 по 1980 гг., объем публикаций вырос, что, вероятно, связано с развитием сейсморазведки, открытием крупных нефтяных месторождений в соляных бассейнах (Мексиканский залив, Прикаспийская впадина, Северное море). Работы нацелены на заложение теоретических основ соляной тектоники, где даются обоснования механических процессов формирования соляных структур, связь их с региональным тектоногенезом, а также растет интерес к подсолевым отложениям. Эксперименты Л.Л. Неттлтона (1934 г.), доказавшие гравитационную природу диапиризма через неустойчивость Рэлея–Тейлора при инверсии плотностей, послужили основой для работы Ф. Трусхейма (1957 г.), который ввел термин «галокинез» для строгого разделения гравитационных движений соли и деформаций, вызванных боковыми тектоническими напряжениями [4].

[1] OpenAlex: The open catalog to the global research system. URL: https://openalex.org/ (дата обращения: 04.08.2026).

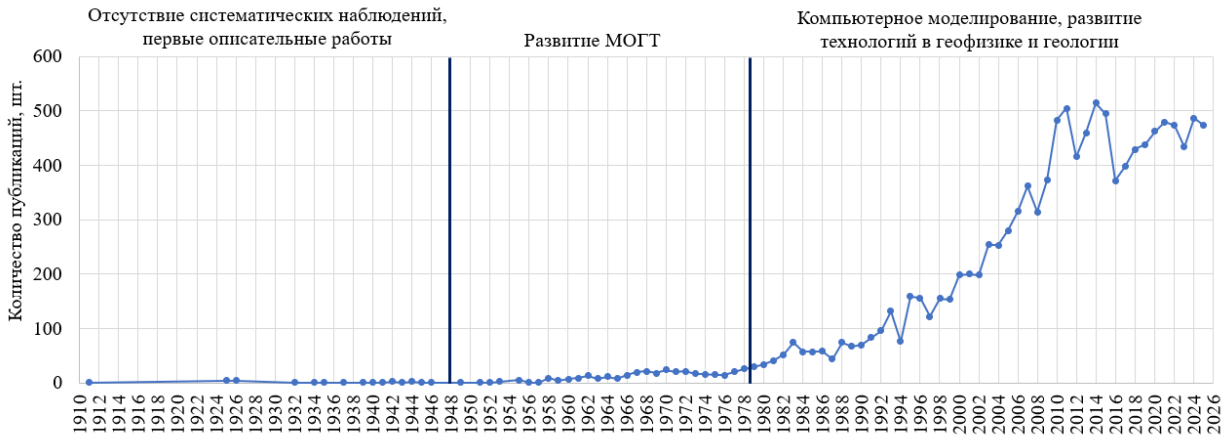

Рис. 1. Динамика публикационной активности по изучению соляной тектоники на базе данных OpenAlex

Fig. 1. Trends in publication activity relating to the study of salt tectonics in the OpenAlex database

В России в 50-х годах ученые Авров В.Я., Айзенштадт Г.Е.-А., Китык В.И., Конищев И.С., Косыгин Ю.А., Чирвинская М.В. и др. предполагали, что ведущую роль в образовании соляных куполов играет изменение положения блоков фундамента, что вызывает нарушение целостности вышележащих осадочных слоев с последующим восходящим потоком соленосных масс [5]. Основные исследования были проведены на территории Прикаспийской впадины, в одном из самых больших солянокупольных бассейнов мира. Активная фаза пришлась на период 1960–1970 гг., в течение которого была разработана обширная база научных трудов, посвященных строению и нефтегазоносному потенциалу соляных куполов [6, 7].

В третий этап с 1980 г. по настоящее время происходит экспоненциальное увеличение публикаций. В этот период появились первые компьютерные геологические модели, происходит активное внедрение 3D-сейсморазведки, компьютерного моделирования, машинного обучения [8, 9].

На графике (см. рис. 1) можно отметить значительные спады: например, в 2008 г. связан с глобальным кризисом 2007–2009 гг., что привело к резкому уменьшению финансирования научных исследований, включая геологию, а в 2014–2016 гг. резкое падение цен на нефть привело к массовому сокращению инвестиций в разведку и исследования в нефтяной индустрии. Спад публикаций в 2023 г., вероятнее всего, обусловлен комбинацией пост-пандемийных задержек, экономической нестабильностью и методологических артефактов, а не снижением интереса к дисциплине, что подтверждается восстановлением показателей в 2024–2025 гг.

По мере «созревания» дисциплины темпы роста объема работ естественным образом замедляются. Также происходит смещение интереса от исследования соляной тектоники как направления фундаментальной геологической науки к смежным областям, таким как подземное хранение CO_2 и H_2 в соляных кавернах, геотермальная энергетика.

За столетнюю историю изучения процессов соляной тектоники были заложены фундаментальные законы, было получено много геолого-геофизической информации. При этом на данный момент все еще остаются нерешенными некоторые вопросы, например, остаются дискуссионными точные триггерные механизмы начала движения соли, трудности точного датирования этапов соляной тектоники и восстановления палеогеометрии соляных структур, прогнозирование геомеханического поведения галогенных толщ и оценка сейсмической опасности при подземном хранении углеводородов (УВ), CO_2 и H_2, сложности получения качественных сейсмических изображений структур под мощными соляными телами из-за волновых помех и аномалий скоростей.

В настоящей работе целью исследования является определение основных трендов изучения соляной тектоники на основе библиометрического анализа для формулирования стратегических направлений развития данного раздела геологии в России. На основе данных OpenAlex выявлены лидирующие страны, научные центры и организации-спонсоры, формирующие актуальную исследовательскую повестку. Выполнена кластеризация тематики публикаций и оценены междисциплинарные связи со смежными специальностями. Определена роль соляной тектоники в контексте глобального энергоперехода, в частности в задачах подземного хранения CO_2 и H_2 и сформулированы рекомендации для российской науки по повышению международной видимости исследований и интеграции современных цифровых методов.

Материалы и методы

В современном мире актуальность темы изучения соляной тектоники иллюстрируется тем, что, по материалам OpenAlex, в 2021 г. было выпущено 480 статей, в 2022 г. – 473, в 2023 г. – 434, в 2024 г. – 487, в 2025 г. – 473 статьи. При этом запрос «salt tectonics» не ограничивается востребованностью соляной тектоники в нефтегазовой отрасли, а выполняется без дополнительной фильтрации по области применения, что позволит показать, в каких областях исследования чаще всего встречаются задачи, связанные с изучением данного направления геологии.

В качестве примеров, раскрывающих тематику изучения соляной тектоники, приведены одни из самых цитируемых статей с открытым доступом за 2025 г.

Исследование структуры Гассум (Восточная Ютландия, Дания) производилось с помощью сейсморазведки высокого разрешения, выполненной с применением инновационной методики двойной регистрации [10]. Авторы демонстрируют, что интеграция данных позволяет получить детализированное изображение асимметричного соляного купола, выявить ранее некартированные разломы, стратиграфические клинья и зоны эрозии кровли, что существенно уточняет модель эволюции структуры. Особое внимание уделено оценке потенциала объекта для геологического захоронения углекислого газа. Так в работе рассматривается методика детального изучения галокинетических структур в контексте энергоперехода и декарбонизации [10].

На примере Миссисипского каньона (Мексиканский залив) рассмотрена методика автоматизированной классификации сейсмических фаций с применением алгоритма машинного обучения.

Основное достижение работы заключается в демонстрации комбинации геометрических, спектральных и амплитудных сейсмических атрибутов с помощью моделей на основе искусственной нейронной сети, что позволяет эффективно выделять потенциальные резервуары для хранения CO_2 и H_2, соляные структуры и разломы даже при отсутствии плотной сети скважинных данных. Новизна исследования состоит в разработке и верификации воспроизводимого рабочего процесса, который обеспечивает более быструю и экономически эффективную интерпретацию 3D-сейсмики по сравнению с традиционными методами. Полученные результаты имеют практическое значение для оценки пригодности галокинетических структур Мексиканского залива для подземного хранения газа и могут быть адаптированы для аналогичных соляных провинций с ограниченным скважинным контролем [11].

Центральная зона Высокого Атласа (Марокко) – классический пример инвертированного рифтового бассейна. На основе полевых данных, дистанционного зондирования и структурного моделирования авторы выделяют соляные валы и мини-бассейны, сформированные в юрский период. Ключевым результатом работы является установление пространственно-временной связи между ростом диапиров и распределением фаций, т. е. в то время как мини-бассейны заполнялись глубоководными отложениями, локальный подъем соляных структур способствовал формированию мелководных карбонатных платформ и карстообразованию. Выявленные структурные и седиментологические закономерности могут быть использованы для улучшения геологических моделей при поиске УВ и оценке потенциала соляных структур для хранения CO_2 и H_2 [12].

Библиометрические базы данных аккумулируют массив статистической информации о научном сообществе. Подобная метрика представляет собой совокупность методологических подходов, основанных на обработке и интерпретации данных, предоставляемых современными реферативными системами. Данный аналитический инструментарий востребован специалистами разных дисциплин и находит применение в широком диапазоне исследовательских задач, включая составление библиометрических обзоров, проведение сценарных прогнозов, выявление тенденций развития отдельных областей знания, изучение научной мобильности исследователей и особенностей международного научного сотрудничества [13].

Существует достаточное количество реферативных баз, самые крупные из них – это Web of Science, Scopus и Google Академия (Google Scholar). В качестве методологической основы для библиометрического анализа была выбрана открытая база данных OpenAlex, которая в современных реалиях становится наиболее объективным и сбалансированным инструментом для определения тенденции развития соляной тектоники как направления геологии. В отличие от коммерческих баз Scopus и Web of Science, OpenAlex обеспечивает более репрезентативный охват не только глобальных нефтегазовых журналов, но и профильных отечественных и региональных изданий, что важно для корректной оценки вклада различных научных школ в изучение нефтегазоносных бассейнов [14].

Анализ и визуализация библиометрических данных выполнены с применением программы VOSviewer для кластеризации ключевых слов [13], построение диаграмм и графиков осуществлено в программном обеспечении (ПО) Excel, для создания карты распределения публикаций по странам использовалось ПО ArcGIS.

Всего с 1910 по 2025 гг. в базе данных OpenAlex по запросу «Salt tectonics», с фильтром «Title & abstract» в открытом доступе было найдено 2525 работ, из них 1377 статей, 240 диссертаций, 59 обзоров, 9 книг. Наибольший интерес для изучения основных тенденций развития раздела «соляной тектоники» как направления геологии, представляют публикации за 2021–2025 гг., за этот период выявлено 1720 работ, из них 1087 – в открытом доступе.

Результаты запроса актуальны на 01.07.2026.

Результаты и обсуждение

Диаграмма распределения ключевых слов по научным направлениям иллюстрирует междисциплинарную природу исследований соляной тектоники (рис. 2).

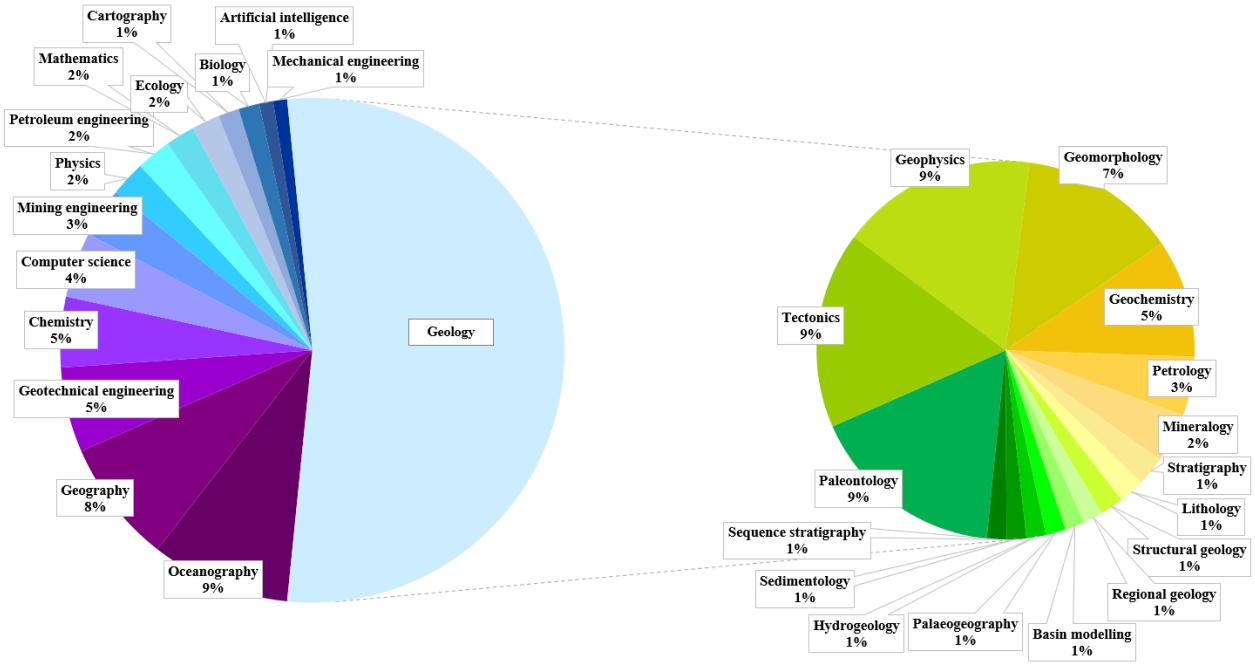

Рис. 2. График ключевых слов по научным направлениям, наиболее часто встречаемых в публикациях 2021–2025 гг. согласно данным OpenAlex

Fig. 2. Chart of the most frequently occurring keywords by research field in publications from 2021 to 2025, according to OpenAlex data

Хотя геология доминирует, значительный вклад вносят океанография, география и геотехническая инженерия. Равномерное распределение геологических наук, таких как тектоника, палеонтология, геоморфология и геохимия, отражает комплексный подход к изучению соляных структур. Важно отметить присутствие современных направлений: искусственный интеллект и компьютерные науки, а также традиционных инженерных дисциплин – нефтегазового и горного дела.

Такое разнообразие подтверждает, что современное изучение соляной тектоники требует интеграции фундаментальных геологических знаний с передовыми технологиями моделирования, инженерными решениями и экологическими аспектами, что особенно актуально для задач поиска и разведки УВ, создания подземных хранилищ газа (ПХГ) и оценки геологических рисков.

Представленный тематический ландшафт ключевых слов (рис. 3) выборки «salt tectonics» отражает четкое выделение в 4 кластера, синий кластер объединяет термины углеводородной системы («source rock», «kerogen», «oil shale» и т. д.).

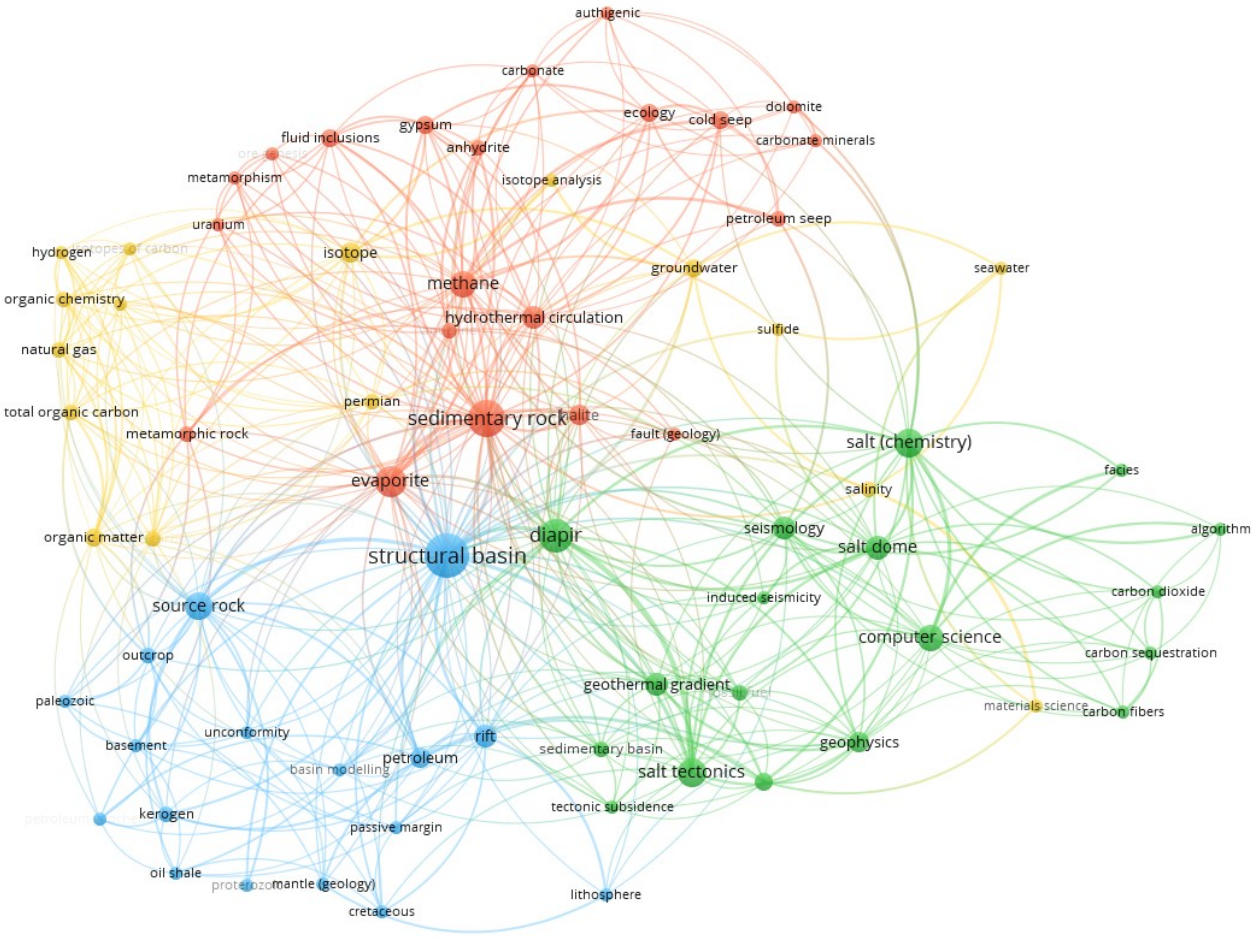

Рис. 3. Кластеризация совместной встречаемости тематик, полученная для выборки «salt tectonics»

Fig. 3. Clustering of co-occurrences of topics, generated for the sample “salt tectonics”

Выборка показывает, что соляная тектоника неразрывно связана с этапами формирования бассейнов, где генерируются углеводороды. Термин «basin modelling» подчеркивает, что без учета движения соли невозможно корректно смоделировать историю созревания керогена и миграцию флюидов. Красный кластер – геохимический – связан с изучением флюидов в галите и изотопным анализом, что позволяет реконструировать пути миграции углеводородов и условия их захоронения. «Hydrothermal circulation» указывает на то, что соляные структуры могут быть ассоциированы с гидротермальной активностью, влияющей на качество коллекторов.

Зеленый кластер, он же технологический, где узлы «salt dome» и «diapir» связаны с «seismology», а появление терминов «carbon dioxide», «carbon sequestration» и computer science свидетельствует о том, что соляные структуры исследуются не только для добычи полезных ископаемых, но и для создания инфраструктуры ПХГ в соляных кавернах, а их сложная геометрия требует применения компьютерного моделирования. Желтый кластер дополняет зеленый, демонстрируя преобладание методов органической геохимии при изучении газовых компонентов и флюидов.

На основе распределения числа публикаций за 2021–2025 гг. по областям исследований (табл. 1) наблюдается, что наибольшее количество работ сосредоточено в области «Geological Formations and Processes» и «Geological and Geophysical Studies Worldwide». «Hydrocarbon Exploration and Reservoir Analysis» свидетельствует о значительном внимании научного сообщества к проблемам разведки углеводородов и анализа коллекторов. Область «Earthquake and Tectonic Studies» представляет особый интерес к тектоническим процессам и сейсмичности, поскольку солянокупольные структуры могут быть ассоциированы с сейсмической активностью. Упоминание терминов «Seismic Imaging and Inversion Techniques», «Geophysical and Geoelectrical Methods» указывает на основную методологию визуализации соляных структур. Присутствуют публикации в областях геохимии, палеоклиматологии, исследований метановых гидратов, палеонтологии и стратиграфии, что также указывает на междисциплинарный характер современных геологических изысканий.

Табл. 1. Распределение числа публикаций (N) в рабочей выборке по предметным областям (Subject area)

Table 1. Distribution of the number of publications (N) in the working sample by subject area

Subject area	N
Geological Formations and Processes	169
Geological and Geophysical Studies Worldwide	145
Hydrocarbon Exploration and Reservoir Analysis	127
Earthquake and Tectonic Studies	106
Geological Studies and Exploration	87
Geochemical Analysis	65
Paleoclimatology Research	65
Seismic Imaging and Inversion Techniques	58
Methane Hydrates and Related Phenomena	46
Geological Formations and Processes Exploration	34
Paleontology and Stratigraphy of Fossils	29
Geologic Mapping	27
Marine and Environmental Studies	26
Geophysical and Geoelectrical Methods	25

По результатам анализа распределения публикаций по странам выявляется лидерство США (185 работ), за которыми следуют Китай (~170), Великобритания (~138), Франция (~140) и Германия (~122) (рис. 4). Наличие крупных соляных провинций выступает первичным фактором, стимулирующим исследования, так лидерство США напрямую коррелирует с наличием Мексиканского залива – одного из наиболее изученных регионов соляной тектоники в мире, где развиты сложные системы аллохтонной соли [15].

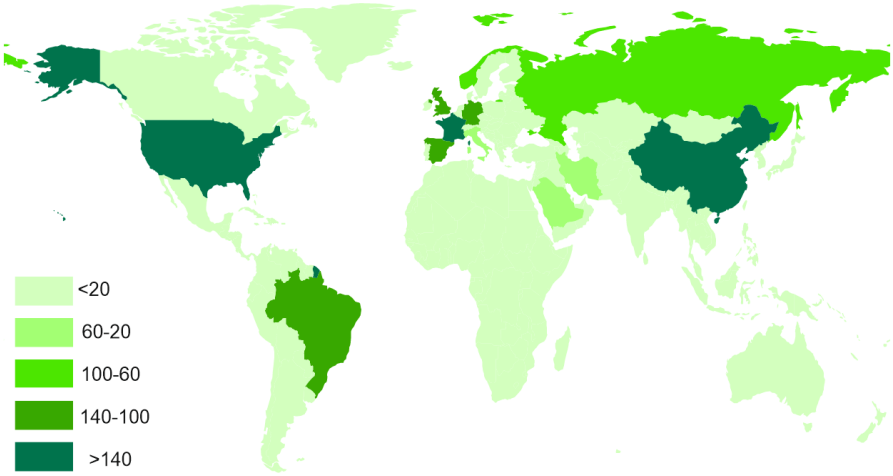

Рис. 4. Карта публикационной активности по теме «соляная тектоника» по данным OpenAlex за 2021–2025 гг.

Fig. 4. Map of publication activity on the topic “salt tectonics” based on OpenAlex data for 2021–2025

Китай занимает второе место, что отражает общие тренды стремительного роста китайской науки в последние два десятилетия. В области соляной тектоники ученые страны исследуют внутренние соляные бассейны (Таримский бассейн, Сино-корейская платформа) с кембрийскими и ордовикскими эвапоритами, в международных коллаборациях одним из стратегических направлений является подземное хранение газа в соляных кавернах [16].

Франция развивает исследования в Западной Африке. Французские исследовательские центры накопили уникальные данные в области соляной тектоники атлантических пассивных окраин Габона, Конго и Анголы [17]. Кроме того, активно изучается мессинский кризис солености Средиземного моря, что представляет фундаментальный интерес для понимания закономерностей эвапоритового осадконакопления в замкнутых бассейнах [18], поэтому научные центры CNRS и INSU занимают лидирующие позиции по научным работам.

Германия, Нидерланды, Норвегия и Великобритания имеют доступ к уникальным данным по соленосному бассейну Северного моря, формирование которого связано с позднепермскими эвапоритовыми отложениями формации Цехштейн[2]. Исследования объекта исторически стимулировались не только нефтегазовым потенциалом, но и практическими задачами подземного хранения углеводородов и CO_2 [19].

[2] *Warren J.* Evaporites // Encyclopedia of Geochemistry / Ed. by W.M. White. Cham, Switzerland: Springer, 2016. P. 1–8. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39193-9_100-1

Высокие позиции Великобритании обусловлены доступом к Северному морю и атлантической окраине, а также развитой нефтегазовой индустрией, стимулирующей исследования соляной тектоники отложений цехштейна [2].

Испания также занимает высокие позиции за счет активного изучения обнажений эвапоритов различных возрастов [20, 21]. Научный кластер представлен CSIC и Университетом Барселоны, их совместные инициативы, включая создание первой комплексной базы данных соляных структур Иберии (IESDB, 2023), свидетельствует о сильной национальной школе геологии и сохраняющемся фундаментальном интересе к изучению эвапоритов Пиренейского полуострова и Средиземноморья.

Бразилия активно развивает исследования в области соляной тектоники в связи с открытием гигантских месторождений в подсолевых резервуарах атлантической пассивной окраины. Накопленные нефтегазовой отраслью 3D-сейсмические данные позволяют сегодня детально изучать структурные особенности соляной тектоники и эволюцию подсолевых ловушек в бассейнах Южной Атлантики [22, 23].

Страны Персидского залива представляют регион, изучающий галогенную толщу формации Хормус, которая связана с обширным формированием соляных куполов в большинстве частей Персидского залива и на суше Ближнего Востока [24].

В России находится один из самых больших и уникальных солеродных бассейнов – Прикаспийская впадина [25], а также фиксируются солевые отложения на северо-востоке Тимано-Печорской провинции [26] и венд-кембрийские соли Сибирской платформы [27], где объектом исследования может выступать подсолевой этаж [28]. Несмотря на это, страна находится на 8-м месте. Это может быть связано с проблемой видимости российских работ в международных базах, так как большинство работ публикуется на русском языке в журналах, индексируемых только в РИНЦ. При этом Российская академия наук входит в тройку наиболее активных центров, демонстрируя высокий научный потенциал в изучении солеродных провинций страны.

Важно отметить методологические ограничения данного анализа. Иностранные базы преимущественно индексируют публикации на английском языке, что дискриминирует исследования, опубликованные на национальных языках. Значительная часть работ выполняется международными группами, что размывает национальный вклад. Например, изучение Мексиканского залива часто выполняется совместными усилиями американских, европейских и латиноамериканских ученых. Не все журналы, особенно региональные и отраслевые, индексируются в международных базах, что приводит к недоучету публикаций в развивающихся странах.

С помощью анализа организаций-спонсоров (табл. 2) определено преобладание государственных научных фондов при значительной роли индустриального сектора. National Natural Science Foundation of China стал лидером по числу грантовых публикаций, что отражает стратегический интерес КНР к изучению внутренних соляных бассейнов. Высокая активность испанских организаций (Agencia Estatal de Investigación, Ministerio de Ciencia e Innovación) указывает на сильную государственную поддержку геологических исследований в стране, в частности изучение мессинского кризиса солености.

Присутствие Petrobras на третьем месте подтверждает ключевую роль нефтегазовой индустрии в финансировании направления, особенно в сфере разработки подсолевых месторождений Бразилии. Европейский кластер представлен немецкими организациями (RWTH Aachen University, Deutsche Forschungsgemeinschaft), что отражает интерес к работам немецкой геологической школы.

Табл. 2. Список спонсирующих организаций для выборки публикаций согласно данным OpenAlex

Table 2. List of sponsoring organizations for the sample of publications, according to OpenAlex data

Funder	N
National Natural Science Foundation of China	48
Agencia Estatal de Investigación	26
Petrobras	23
Ministerio de Ciencia e Innovación	22
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	15
RWTH Aachen University	15
Deutsche Forschungsgemeinschaft	13
Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	12
European Regional Development Fund	12
University of Texas at Austin	11

Основное внимание изучению солеродных бассейнов уделяется в контексте нефтепоисковых работ и создания подземных хранилищ газа (CO_2, H_2), в связи с этим важно проанализировать взаимосвязь терминов «соляная тектоника», «углеводороды» и «водород». Исходя из графика публикаций (рис. 5) на основе базы OpenAlex демонстрируется устойчивый рост интереса к исследованиям соляной тектоники в контексте поиска, разведки и добычи углеводородов на протяжении 25 лет.

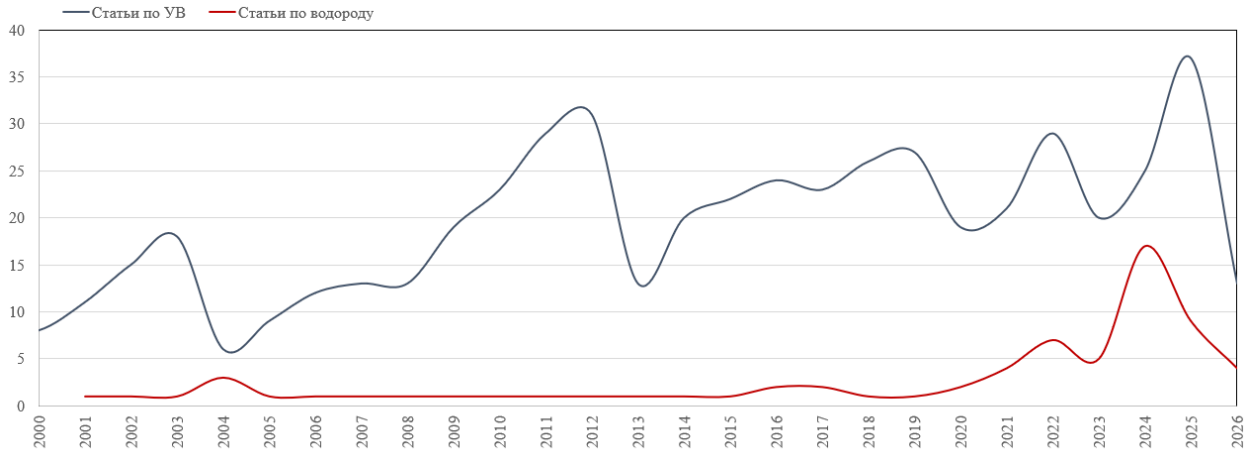

Рис. 5. График публикаций по темам «углеводороды» и «водород» в связи с соляной тектоникой

Fig. 5. Graph showing publications on the topics “hydrocarbons” and “hydrogen” in relation to salt tectonics

Интересно, что резкий рост с 2 до 17 статей произошел в период 2022–2024 гг. по водородной тематике, что вероятно связано с глобальным энергетическим переходом и программами декарбонизации, где соляные формации рассматриваются как перспективные хранилища для водорода. В 2025 г. наблюдается пик в углеводородной тематике, на что могло повлиять внедрение новых методов обработки и визуализации сейсмических данных, открытие месторождений нефти и газа в подсолевых отложениях.

Синхронный рост публикаций по обеим темам в 2022–2024 гг. отражает системный сдвиг, так соляная тектоника больше не изучается исключительно в контексте углеводородов, а становится междисциплинарной платформой для решения задач энергоперехода, объединяющей традиционную нефтегазовую отрасль с водородной энергетикой и технологиями декарбонизации.

Проведенный библиометрический обзор демонстрирует, что исследования соляной тектоники претерпевают концептуальные изменения. Если исторически дисциплина определялась задачами нефтегазового сектора (что подтверждается доминированием кластеров углеводородов, бассейнового моделирования и структурного анализа), то современные тренды указывают на расширение вектора. Быстрый рост публикаций по связанным темам «водород» и «соляная тектоника» свидетельствует о трансформации роли соляных структур: от ловушек флюидов к элементам энергетической инфраструктуры (ПХГ). При этом выявляется дефицит работ на стыке с компьютерными науками, что подчеркивает необходимость внедрения цифровых методов (искусственный интеллект, машинное обучение) для решения различных задач.

Каждый скачок публикационной активности коррелирует с появлением новых технологий: развитие сейсмических методов → нарастание цифровизации (3D-моделирование, искусственный интеллект). Современные исследования объединяют структурную геологию, геофизику и моделирование. Вероятно, что после 2026 г. ожидается большое количество работ с акцентом на цифровые двойники нефтегазоносных бассейнов, осложненных соляными дисгармоничными структурами и предиктивное моделирование галокинеза и соляной тектоники.

Распределение публикаций показывает превалирование фундаментальных исследований геологических процессов и прикладных работ по разведке углеводородов, что коррелирует с практической значимостью для нефтегазовой отрасли, при этом демонстрируется переход от описательной деятельности к прогнозному цифровому моделированию, где соляная тектоника рассматривается как комплексный динамический процесс.

Анализ сети совместного употребления ключевых слов по запросу «Salt tectonics» свидетельствует о смещении фокуса исследований соляной тектоники от традиционной геологии углеводородов к инфраструктурным проектам энергетического перехода. Соляные купола и каверны все чаще оцениваются как перспективные объекты для хранения газов, а изучение их сложной геометрии и флюидного режима требует применения высокоточного компьютерного моделирования и углубленных геохимических исследований.

Высокая цитируемость работ из Великобритании, Франции и Германии отражает не столько наличие соленосных бассейнов, сколько исторически сложившуюся роль европейских исследовательских центров в разработке методологии изучения геологии, в частности соляной тектоники. Позиция России не совсем соответствует масштабу исследований в этом направлении в Прикаспийской впадине, Тимано-Печорской провинции и Сибирской платформе. Это обусловлено публикацией преимущественно в русскоязычных журналах с ограниченным международным охватом, недостаточным участием в международных коллаборациях, отставанием в цифровизации архивных данных.

Распределение финансирования исследований по соляной тектонике подтверждает, что развитие данной отрасли геологии сегодня одинаково стимулируется как национальными научными стратегиями, так и глобальным коммерческим спросом на освоение углеводородов. При этом следует отметить, что поле «Funder» носит оценочный характер ввиду несистематического заполнения метаданных.

Заключение

В настоящей статье на основе библиометрического анализа базы данных OpenAlex определены основные тренды изучения соляной тектоники и сформулированы стратегические направления развития данного раздела геологии применительно к задачам российской науки.

На основе результатов можно предположить, что для преодоления разрыва между геологической изученностью российских соленосных бассейнов и их цитируемостью в международных базах данных (OpenAlex, Scopus) необходимо не только перейти к практике публикации результатов на английском языке в журналах уровня Q1/Q2 с интеграцией с международными базами данных и обязательным дублированием в отечественных изданиях, но и сконцентрировать усилия на создании открытых баз данных по эталонным разрезам Прикаспийской и Тимано-Печорской провинций для верификации зарубежных алгоритмов, интегрировать методы геофлюидодинамического моделирования, а также элементы искусственного интеллекта, что соответствует текущим глобальным трендам.

Также необходимо выделить, что для России приоритетом должна стать адаптация международных методик к внутренним бассейнам с учетом отечественного опыта глубинной сейсморазведки и структурного моделирования. Перспективными направлениями развития темы могут стать:

– Распознавание соляных границ на данных 3D-сейсмики с помощью искусственного интеллекта, геофлюидодинамическое моделирование как в контексте нефтепоисковых изысканий, так и для создания подземных хранилищ газа (CO_2, H_2), создание цифровых двойников солеродных провинций;

– Необходимость переинтерпретации архивной 2D/3D сейсмики с учетом современных алгоритмов и совместного моделирования соляных куполов и подсолевых разрезов;

– Изучение связи галокинеза с рифтогенезом, термобарическим режимом, гидродинамикой и сохранностью УВ в соленосных бассейнах.

Вклад авторов

А.К. Юмашева – методология, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание рукописи и ее редактирование.

М.П. Антипов – администрирование проекта, концептуализация, формальный анализ, создание рукописи и ее редактирование.

Все авторы одобрили окончательную версию публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование искусственного интеллекта

При написании текста статьи генеративные системы искусственного интеллекта не использовались.

Список источников

1. *Day J.W., Clark H.C., Chang C.,* et al. Life cycle of oil and gas fields in the Mississippi River Delta: A review // Water. 2020. Vol. 12, No. 5. P. 1492. https://doi.org/10.3390/w12051492

2. *Jackson M.P.A., Hudec M.R.* Salt Tectonics: Principles and Practice. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 498 p. https://doi.org/10.1017/9781139003988

3. *Spencer J.A.* The race for the first Louisiana oil “discovery” // GeoGulf Transactions. 2020. Vol. 70, No. 1. P. 203–212.

4. *Чайковский И.И.* Типизация основных механизмов соляной тектоники мира: Верхнекамское месторождение как эталон многоэтапного гравитационного скольжения // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. 2013. № 1. С. 18–37. EDN: RCABMR

5. *Лунев Б.В., Лапковский В.В., Антипов М.П.* и др. Влияние строения эвапоритовой формации на формирование структур соляной тектоники и ловушек углеводородов (по результатам численного моделирования галокинеза в Прикаспии) // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14, № 2. С. 2–18. https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-2-0690

6. *Ажгалиев Д.К., Валиуллин Р.А., Габбасова А.К., Исенов С.М.* Солянокупольная тектоника и нефтегазоносность восточного борта Прикаспийской впадины по данным геофизических методов исследований // Известия Уральского государственного горного университета. 2021. Вып. 4(64). С. 27–42. EDN: HNQMBL

7. *Волож Ю.А., Мельников П.Н., Милетенко Н.В.* и др. Освоение ресурсов углеводородов глубоких горизонтов Прикаспийской нефтегазоносной провинции // Геология нефти и газа. 2024. № 5. С. 5–16. https://doi.org/10.47148/0016-7894-2024-5-5-16

8. *Back S., Amberg S., Sachse V., Littke R.* Reconstructing 3D subsurface salt flow // Solid Earth. 2022. Vol. 13, No. 6. P.1027–1043. https://doi.org/10.5194/se-13-1027-2022

9. *Mattson A.G., Gani M.R., Roesler T.,* et al. 3D mapping of intruding salt bodies in the subsurface of the Gulf of Mexico using 3D seismic data // Results in Geophysical Sciences. 2020. Vols. 1–4. P. 100004. https://doi.org/10.1016/j.ringps.2020.100004

10. *Westgate M., Kucinskaite K., Konstantinidis E.,* et al. Seismic imaging of halokinetic sequences and structures with high-resolution, dual-element acquisition, and processing: Applications to

the Gassum structure in Eastern Jutland, Denmark // Earth and Space Science. 2025. Vol. 12, No.1. P. e2024EA004014. https://doi.org/10.1029/2024EA004014

11. *Samuel S., Knapp C., Knapp J.* Seismic facies classification of salt structures and sediments in the northern Gulf of Mexico using self-organizing maps // Geosciences (Switzerland). 2025. Vol. 15, No. 5. P. 183. https://doi.org/10.3390/geosciences15050183

12. *Saura P.E., Martín-Martín J.D.* Shoulder to shoulder architecture of a salt-related rift basin at the onset of continental break-up // Marine and Petroleum Geology. 2025. Vol. 176. P. 19. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2025.107338

13. *Малахов В.А.* Библиометрический анализ как метод науковедческих исследований: возможности и ограничения // Науковедческие исследования. 2022. № 1. С. 212–227. EDN: YHIJPI

14. *Редькина Н.С.* Российская наука в системе открытых научных знаний OpenAlex // Управление наукой: теория и практика. 2024. Т. 6, № 4. С. 86–104. https://doi.org/10.19181/smtp.2024.6.4.5

15. *Curry M.E., Hudec M.R., Peel F.J.,* et al. Structural restorations of the complete conjugate US-Mexico eastern Gulf of Mexico margin // Tectonics. 2024. Vol. 43, No. 1. P. e2023TC007897. https://doi.org/10.1029/2023TC007897

16. *Wan M., Ji W., Wan J.,* et al. Compressed air energy storage in salt caverns in China: Development and outlook // Advances in Geo-Energy Research. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 54–67. https://doi.org/10.46690/ager.2023.07.06

17. *Pichel L.M., Legeay E., Ringenbach J.-C., Callot J.-P.* The West African salt-bearing rifted margin – Regional structural variability and salt tectonics between Gabon and Namibe // Basin Research. 2023. Vol. 35, No. 6. P. 2217–2248. https://doi.org/10.1111/bre.12796

18. *Roveri M., Lugli S., Manzi V.* The desiccation and catastrophic refilling of the Mediterranean: 50 years of facts, hypotheses, and myths around the Messinian salinity crisis // Annual Review of Marine Science. 2025. Vol. 17. P. 485–509. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-021723-110155

19. *Barnett H.G., Ireland M.T., Van Der Land C.* Capturing geological uncertainty in salt cavern developments for hydrogen storage // Earth Science, Systems and Society. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 10125. https://doi.org/10.3389/esss.2024.10125

20. *Artiaga D.T., García-Veigas J., Cendón D.I.,* et al. The Messinian evaporites of the Mesaoria basin (North Cyprus): A discrepancy with the current chronostratigraphic understanding // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2021. Vol. 584. P. 110681. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110681

21. *Ortí F., Pérez-López A., Salvany J.M.* Triassic evaporites of Iberia: Sedimentological and palaeogeographical implications for the western Neotethys evolution during the Middle Triassic–Earliest Jurassic // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2017. Vol. 471. P. 157–180. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.01.025

22. *Kukla P.A., Strozyk F., Mohriak W.U.* South Atlantic salt basins – Witnesses of complex passive margin evolution // Gondwana Research. 2018. Vol. 53. P. 41–57. https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.03.012

23. *Magee C., Pichel L.M., Madden-Nadeau A.L.,* et al. Salt–magma interactions influence intrusion distribution and salt tectonics in the Santos Basin, offshore Brazil // Basin Research. 2021. Vol. 33, No. 3. P. 1820–1843. https://doi.org/10.1111/bre.12537

24. *Thomas R.J., Ellison R.A., Goodenough K.M.,* et al. Salt domes of the UAE and Oman: Probing eastern Arabia // Precambrian Research. 2015. Vol. 256. P. 1–16. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.011

25. *Антипов М.П., Быкадоров В.А., Волож Ю.А.* и др. Палеогеографические реконструкции формирования пермской соленосной формации Каспийского региона // Вестник Пермского университета. Геология. 2026. Т. 25, № 1. С. 19–27. https://doi.org/10.17072/psu.geol.25.1.19

26. *Грунис Е.Б., Ростовщиков В.Б., Богданов Б.П.* Соли ордовика и их роль в особенностях строения и нефтегазоносности северо-востока Тимано-Печорской провинции // Георесурсы. 2016. Т. 18, № 1. С. 13–23. https://doi.org/10.18599/grs.18.1.3

27. *Соборнов К.О.* Соленосные складчато-надвиговые пояса Северной и Центральной Евразии: строение и нефтегазоносность // Геология нефти и газа. 2024. № 5. С. 45–66. https://doi.org/10.47148/0016-7894-2024-5-45-66

28. *Севостьянова Р.Ф., Абукова Л.А.* Гидрогеологические условия подсолевого этажа Мирнинского свода с позиций использования пластовых вод как источника гидроминерального сырья // Актуальные проблемы нефти и газа. 2025. Т. 16, № 1. С. 36–49. https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2025.06

Информация об авторах

Анастасия Константиновна Юмашева – младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; SPIN-код: 2830-7413, https://orcid.org/0009-0006-2663-058X; e-mail: yumasheva@ipng.ru

Михаил Петрович Антипов – канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; SPIN-код: 8666-1809, https://orcid.org/0000-0002-2929-6648; e-mail: mpantipov@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.07.2026

Принята к публикации 06.08.2026

NEW METHODS AND TECHNOLOGIES OF STUDYING THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT OF OIL AND GAS BASINS

Original article

Current studies of the process of salt tectonics in sedimentary basins of the world in the context of their oil and gas potential

Anastasia K. Yumasheva ✉, Mikhail P. Antipov
Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina St., Moscow, 119333, Russia

Abstract. *Introduction*. In recent years, issues relating to the influence of salt tectonics on the accumulation and barrier properties of halogen-bearing caps have been studied to varying degrees. To gain a comprehensive understanding of the current state of research in this field, it is advisable to conduct a bibliometric analysis, which enables the identification of current trends in the development of scientific and practical knowledge. *Objective.* To conduct a comprehensive analysis of the current state of research into salt tectonics as a geological process that determines the formation of salt structures in oil and gas basins. The work is aimed at identifying key trends in the development of this field and determining promising areas of research into the formation processes of disharmonic salt structures for Russian geological science. *Materials and methods.* Using data from OpenAlex covering the period 1910–2025, and employing keyword co-occurrence analysis and geospatial analysis, this study examines the global research landscape of salt tectonics to identify the thematic structure, dynamics, and geographical distribution of publications. *Results*. Four thematic clusters were identified: hydrocarbon, geochemical, technological, and fluid. An increase in the number of works on hydrogen-related topics was recorded between 2022 and 2024, reflecting the transformation of the role of salt structures from hydrocarbon traps to elements of the energy infrastructure. It was established that the United States, China, and the countries of Western Europe lead the way in terms of publication output; this is due to a combination of factors, such as the extent to which oil and gas resources in salt-bearing provinces have been developed and the concentration of historically established research centers. Although Russia ranks among the top ten, its position does not reflect the true geological potential of its salt-bearing basins due to the low international visibility of Russian-language publications. *Conclusion.* To bridge the gap between the level of geological research into Russian basins and their international citation rates, it is necessary to transition to English-language publications in Q1/Q2 journals, to create open-access databases of reference sections, and to integrate artificial intelligence methods and geofluid dynamics modeling.

Keywords: salt tectonics; sedimentary basins; bibliometric analysis; thematic clustering; hydrocarbons; hydrogen storage; OpenAlex

Funding: the work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. 125020501406-8).

For citation: Yumasheva A.K., Antipov M.P. Current studies of the process of salt tectonics in sedimentary basins of the world in the context of their oil and gas potential. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2026. Vol. 17, No. 3. P. 395–414. (In Russ.).

✉ Anastasia K. Yumasheva, yumasheva@ipng.ru
© Yumasheva A.K., Antipov M.P., 2026

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Author contributions

Anastasia K. Yumasheva – methodology, investigation, writing – original draft, writing – review & editing.

Mikhail P. Antipov – project administration, conceptualization, formal analysis, writing – review & editing.

All the authors approved the final version of the publication.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Use of artificial intelligence

Generative artificial intelligence tools were not used in writing the text of the article.

References

1. Day J.W., Clark H.C., Chang C., et al. Life cycle of oil and gas fields in the Mississippi River Delta: A review. *Water.* 2020. Vol. 12, No. 5. P. 1492. https://doi.org/10.3390/w12051492

2. Jackson M.P.A., Hudec M.R. *Salt Tectonics: Principles and Practice.* Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 498 p. https://doi.org/10.1017/9781139003988

3. Spencer J.A. The race for the first Louisiana oil "discovery". *GeoGulf Transactions.* 2020. Vol. 70, No. 1. P. 203–212.

4. Tchaikovski I.I. Main mechanisms typification of world salt tectonics: Verkhnekamskoe deposit as standard of multi-stage gravitational sliding. *Perm Federal Research Centre Journal.* 2013. No. 1. P. 18–37. (In Russ.).

5. Lunev B.V., Lapkovsky V.V., Antipov M.P., et al. Influence of the evaporite formation structure on salt tectonics and hydrocarbon traps (by the results of numerical simulation of halokinesis in the Pre-Caspian). *Geodynamics & Tectonophysics.* 2023. Vol. 14, No. 2. P. 2–18. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-2-0690

6. Azhgaliev D.K., Valiullin R.A., Gabbasova A.K., Isenov S.M. Salt dome tectonics and oil-and-gas content of the eastern side of the Peri-Caspian depression according to geophysical research methods. *News of the Ural State Mining University.* 2021. No. 4(64). P. 27–42. (In Russ.).

7. Volozh Yu.A., Melnikov P.N., Miletenko N.V., et al. Deep horizons of Caspian Petroleum Province: Hydrocarbon resource development. *Geologiya nefti i gaza.* 2024. No. 5. P. 5–16. (In Russ.). https://doi.org/10.47148/0016-7894-2024-5-5-16

8. Back S., Amberg S., Sachse V., Littke R. Reconstructing 3D subsurface salt flow. *Solid Earth.* 2022. Vol. 13, No. 6. P.1027–1043. https://doi.org/10.5194/se-13-1027-2022

9. Mattson A.G., Gani M.R., Roesler T., et al. 3D mapping of intruding salt bodies in the subsurface of the Gulf of Mexico using 3D seismic data. *Results in Geophysical Sciences.* 2020. Vols. 1–4. P. 100004. https://doi.org/10.1016/j.ringps.2020.100004

10. Westgate M., Kucinskaite K., Konstantinidis E., et al. Seismic imaging of halokinetic sequences and structures with high-resolution, dual-element acquisition, and processing: Applications to the Gassum structure in Eastern Jutland, Denmark. *Earth and Space Science.* 2025. Vol. 12, No. 1. P. e2024EA004014. https://doi.org/10.1029/2024EA004014

11. Samuel S., Knapp C., Knapp J. Seismic facies classification of salt structures and sediments in the northern Gulf of Mexico using self-organizing maps. *Geosciences (Switzerland).* 2025. Vol. 15, No. 5. P. 183. https://doi.org/10.3390/geosciences15050183

12. Saura P.E., Martín-Martín J.D. Shoulder to shoulder architecture of a salt-related rift basin at the onset of continental break-up. *Marine and Petroleum Geology.* 2025. Vol. 176. P. 19. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2025.107338

13. Malahov V.A Bibliometric analysis as a method of scientific research: Opportunities and limitations. *Naukovedcheskie issledovaniya.* 2022. No. 1. P. 212–227. (In Russ.).

14. Redkina N.S. Russian science in the OpenAlex system of open scientific knowledge. *Science Management: Theory and Practice.* 2024. Vol. 6, No. 4. P. 86–104. (In Russ.). https://doi.org/10.19181/smtp.2024.6.4.5

15. Curry M.E., Hudec M.R., Peel F.J., et al. Structural restorations of the complete conjugate US-Mexico eastern Gulf of Mexico margin. *Tectonics.* 2024. Vol. 43, No. 1. P. e2023TC007897. https://doi.org/10.1029/2023TC007897

16. Wan M., Ji W., Wan J., et al. Compressed air energy storage in salt caverns in China: Development and outlook. *Advances in Geo-Energy Research.* 2023. Vol. 9, No. 1. P. 54–67. https://doi.org/10.46690/ager.2023.07.06

17. Pichel L.M., Legeay E., Ringenbach J.-C., Callot J.-P. The West African salt-bearing rifted margin – Regional structural variability and salt tectonics between Gabon and Namibe. *Basin Research.* 2023. Vol. 35, No. 6. P. 2217–2248. https://doi.org/10.1111/bre.12796

18. Roveri M., Lugli S., Manzi V. The desiccation and catastrophic refilling of the Mediterranean: 50 years of facts, hypotheses, and myths around the Messinian salinity crisis. *Annual Review of Marine Science.* 2025. Vol. 17. P. 485–509. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-021723-110155

19. Barnett H.G., Ireland M.T., Van Der Land C. Capturing geological uncertainty in salt cavern developments for hydrogen storage. *Earth Science, Systems and Society.* 2024. Vol. 4, No. 1. P. 10125. https://doi.org/10.3389/esss.2024.10125

20. Artiaga D.T., García-Veigas J., Cendón D.I., et al. The Messinian evaporites of the Mesaoria basin (North Cyprus): A discrepancy with the current chronostratigraphic understanding. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* 2021. Vol. 584. P. 110681. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110681

21. Ortí F., Pérez-López A., Salvany J.M. Triassic evaporites of Iberia: Sedimentological and palaeogeographical implications for the western Neotethys evolution during the Middle Triassic–Earliest Jurassic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* 2017. Vol. 471. P. 157–180. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.01.025

22. Kukla P.A., Strozyk F., Mohriak W.U. South Atlantic salt basins – Witnesses of complex passive margin evolution. *Gondwana Research.* 2018. Vol. 53. P. 41–57. https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.03.012

23. Magee C., Pichel L.M., Madden-Nadeau A.L., et al. Salt–magma interactions influence intrusion distribution and salt tectonics in the Santos Basin, offshore Brazil. *Basin Research.* 2021. Vol. 33, No. 3. P. 1820–1843. https://doi.org/10.1111/bre.12537

24. Thomas R.J., Ellison R.A., Goodenough K.M., et al. Salt domes of the UAE and Oman: Probing eastern Arabia. *Precambrian Research.* 2015. Vol. 256. P. 1–16. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.011

25. Antipov M.P., Bykadorov V.A., Volozh Yu.A., et al. Paleogeological models of Permian evaporite basin within Caspian Region. *Bulletin of Perm University. Geology.* 2026. Vol. 25, No. 1. P. 19–27. (In Russ.). https://doi.org/10.17072/psu.geol.25.1.19

26. Grunis E.B., Rostovschikov V.B., Bogdanov B.P. Ordovician salts and their role in the structure and oil and gas potential of the northeast of the Timan-Pechora province. *Georesursy.* 2016. Vol. 18, No. 1. P. 13–23. https://doi.org/10.18599/grs.18.1.3

27. Sobornov K.O. Salt-bearing fold-and-thrust belts of Northern and Central Eurasia: Structure and petroleum potential. *Geologiya nefti i gaza.* 2024. No. 5. P. 45–66. (In Russ.). https://doi.org/10.47148/0016-7894-2024-5-45-66

28. Sevostianova R.F., Abukova L.A. Hydrogeological conditions of the subsalt level of the Mirny arch from the standpoint of using formation waters as a source of hydromineral raw materials. *Actual Problems of Oil and Gas.* 2025. Vol. 16, No. 1. P. 36–49. (In Russ.). https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2025.06

Information about the authors

Anastasia K. Yumasheva – Junior Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; https://orcid.org/0009-0006-2663-058X; e-mail: yumasheva@ipng.ru

Mikhail P. Antipov – Cand. Sci. (Geol.-Min.), Leading Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, https://orcid.org/0000-0002-2929-6648; e-mail: mpantipov@yandex.ru

Received 22 July 2026
Accepted 6 August 2026