



Научная статья

УДК 549.01:551.217.24

EDN: TIUGOQ

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-2-7

Магматогенно-гидротермальная модель формирования флюидодинамических структур и месторождений редкометалльных рассолов в чехле Сибирской платформы

А.Г. Вахромеев^{a,✉}, М.А. Данилова^b, Н.В. Мисюркеева^c, А.В. Сергеева^d,
А.В. Кирюхин^e, Д.О. Мамаков^f, Д.А. Погребная^g, А.В. Левин^h,
А.В. Ощепковаⁱ, С.К. Квачко^j, А.В. Корзун^k

^{a,b,h,i,j,k} Филиал ООО «РН-ГИР» в городе Москве – Центр технических компетенций

Института геологии и разработки горючих ископаемых, Красноярск, Российская Федерация

^{a,c} Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Российская Федерация

^{a,b} Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

^{d,e} Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

^f ООО «Сибгаз», Иркутск, Российская Федерация

^g ООО «Энерджи Крафт», Москва, Российская Федерация

ⁱ Филиал ООО «РН-ГИР» в городе Красноярске, Красноярск, Российская Федерация

^k Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

^c ООО «СИГМА-ГЕО», Иркутск, Российская Федерация

Резюме. Колоссальные по своим масштабам процессы платформенных этапов магматизма, палеовулканической деятельности на Сибирской платформе известны излиянием гигантских объемов базальтовой магмы, формированием кимберлитовых полей, железных, редкоземельных и сульфидных руд, а также изменениями в локализации месторождений углеводородов. Эти процессы, инициированные прохождением кратона над «горячей точкой» гигантского суперплюма, охватывали многие аспекты эволюции гидрогеологических, в том числе магматогенно-гидротермальных, палеосистем в осадочном чехле древнего кратона. Речь пойдет о природе и понятии «флюидодинамическая структура» как части магматогенно-гидротермальной модели эволюции вулканогенно-осадочного чехла на примере Ангаро-Ленского артезианского бассейна. Целью проведенного исследования являлось обоснование магматогенно-гидротермальной модели формирования флюидодинамических структур и преобразования редкометалльных промышленных рассолов в вулканогенно-осадочном чехле Сибирской платформы. В работе использованы архивные и новейшие материалы по сейсмо- и электроразведке, массивы геопромысловых данных глубокого бурения, гидрогеохимического опробования рассолов. Авторы трактуют наблюдаемые на сейсмогеологических разрезах субвертикальные и сопряженные с ними на ряде объектов субгоризонтальные зоны потери отражений как флюидодинамические структуры, сформированные в магматический и постмагматический пневматолитово-гидротермальный этапы. Воздействие поднимающихся через глубинные коровые разломы и узлы повышенной проницаемости тектоносферы в верхнюю кору магматических расплавов привело к импульсному формированию пародоминирующих флюидонапорных систем. По представлениям авторов, циркуляция парогидротерм по вторичным системам фильтрации привела к глубокому преобразованию гидрогеохимии первично-седиментогенных рассолов осадочного бассейна. Одновременно происходило изменение пород-коллекторов с формированием высокочастотных природных резервуаров вследствие процессов гидроразрыва, термолифта, парогазовой и фумарольной активности. Этапы платформенного магматизма и постмагматические процессы сыграли важнейшую рудоформирующую и рудолокализирующую роль в металлогении – минерации промышленных металлоносных рассолов, обусловили вторичное концентрирование богатейшей «жидкой» руды редких, рассеянных элементов и минеральных солей, в том числе брома, щелочных металлов – лития, рубидия, цезия, калия, соединений со щелочноземельными кальцием и стронцием.

Ключевые слова: гидротермы, вулканогенно-осадочный чехол, флюидодинамические структуры, пародоминирующие резервуары, глубинный соляной карст, металлоносные промышленные рассолы

Финансирование. Исследование выполнено по планам научно-исследовательских работ филиала ООО «РН-ГИР» в г. Москве, Института земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия; проект FWEF-2026-0011 по теме «Строение и состояние земной коры и верхней мантии Азиатского континента по геофизическим данным, методика поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых») и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский, Россия; проект FWME-2024-0007 по теме «Тепломассоперенос, сейсмичность и минеральные преобразования в гидротермальных и вулканических системах, термогидродинамическое-геохимическое-геомеханическое моделирование, приложения для оценки геотермальных ресурсов, прогноза

© Вахромеев А.Г., Данилова М.А., Мисюркеева Н.В., Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Мамаков Д.О., Погребная Д.А., Левин А.В., Ощепкова А.В., Квачко С.К., Корзун А.В., 2026



катастрофических гидротермальных процессов, извержений вулканов и сильнейших землетрясений») с использованием ресурсов Центра коллективного пользования Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа».

Благодарности. Авторы искренне благодарны члену-корреспонденту Российской академии наук, доктору геолого-минералогических наук, директору Института земной коры СО РАН Дмитрию Петровичу Гладкочубу (г. Иркутск, Россия) за всестороннюю поддержку идеи исследований, консультации и ценные замечания, члену-корреспонденту Российской академии наук, доктору геолого-минералогических наук, директору Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН Алексею Юрьевичу Озерову (г. Петропавловск-Камчатский, Россия) за дискуссию и любезно предоставленные им фотографии образцов с явлениями гидровулканизма для настоящей статьи.

Для цитирования: Вахромеев А.Г., Данилова М.А., Мисюркеева Н.В., Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Мамаков Д.О. [и др.]. Магматогенно-гидротермальная модель формирования флюидодинамических структур и месторождений редкометалльных рассолов в чехле Сибирской платформы // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 2. С. ?–?. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-7>. EDN: TIUGOQ.

Original article

Magmatogenic-hydrothermal formation model of fluid dynamic structures and rare metal brine deposits in Siberian Platform cover

Andrey G. Vakhromeev^{a,✉}, Maria A. Danilova^b, Natalia V. Misyurkeeva^c,
Anastasia V. Sergeeva^d, Aleksey V. Kiryukhin^e, Denis O. Mamakov^f,
Daria A. Pogrebnaia^g, Aleksey V. Levin^h, Anastasia V. Oshchepkovaⁱ,
Svetlana K. Kvachko^j, Anna V. Korzun^k

^{a,b,h,i,j,k}Branch of RN-Geology Research Development LLC in Moscow – Technical Competence Centre of the Institute of Geology and Fossil Fuel Development, Krasnoyarsk, Russian Federation

^{a,c}Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

^{a,b}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

^{d,e}Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

^fSibgaz LLC, Irkutsk, Russian Federation

^gEnergy Craft LLC, Moscow, Russian Federation

^jBranch of RN-Geology Research Development LLC in Krasnoyarsk, Krasnoyarsk, Russian Federation

^kLomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

^cSIGMA-GEO LLC, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The enormous-scale processes of platform stages of magmatism and paleovolcanic activity on the Siberian Platform are characterized by the effusio of gigantic volumes of basaltic magma, the formation of kimberlite fields, iron, rare earth, and sulfide ores, as well as changes in the localization of hydrocarbon deposits. These processes, initiated by the passage of the craton over the “hotspot” of the giant super-plume encompassed many aspects of the evolution of hydrogeological, including magmatic-hydrothermal, paleosystems in the sedimentary cover of the ancient craton. This paper examines the nature and concept of «fluid–dynamic structure» as part of the magmatic-hydrothermal model of volcanogenic-sedimentary cover evolution using the Angara-Lena artesian basin as an example. The purpose of the study is to substantiate a magmatic-hydrothermal formation model of fluid-dynamic structures and transformation of rare-metal industrial brines in the volcanogenic-sedimentary cover of the Siberian Platform. This study uses archival and up-to-date seismic and electrical exploration data, deep-drilling geotechnical datasets, and hydrogeochemical brine sampling. The authors interpret the subvertical and associated subhorizontal zones of reflection loss observed in seismic sections at a number of sites as fluid-dynamic structures formed during the magmatic and postmagmatic pneumatolytic-hydrothermal stages. The impact of magmatic melts rising into the upper crust through deep crustal faults and areas of increased permeability of the tectonosphere led to the pulsed formation of vapor-dominated fluid pressure systems. According to the authors, the circulation of vapor-hydrothermal fluids through secondary filtration systems led to profound transformations in the hydrogeochemistry of the primary sedimentogenic brines of the sedimentary basin. At the same time, the reservoir rocks were transformed, with the development of high-capacity natural reservoirs driven by hydraulic fracturing, thermolift, and vapor-gas and fumarolic activity. The stages of platform magmatism and post-magmatic processes played a crucial ore-forming and ore-localizing role in the metallogeny and mineral genesis of industrial metal-bearing brines, determined the secondary concentration of the richest «liquid» ore of rare, dispersed elements, and mineral salts, including bromine, alkali metals – lithium, rubidium, cesium, potassium, and compounds with alkaline earth calcium and strontium.

Keywords: hydrothermal vents, volcanogenic-sedimentary cover, fluid-dynamic structures, vapor-dominated reservoirs, deep salt karst, metalliferous industrial brines



Funding. The study was carried out according to the research project of the RN-Geology Research Development LLC in Moscow, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (project FWEF-2026-0011 "Structure and condition of the Earth's crust and upper mantle of the Asian continent according to geophysical data, methods of search, exploration and development of mineral deposits") and the Institute of Volcanology and Seismology of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, (Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation; project FWME-2024-0007 "Heat and mass transfer, seismicity and mineral transformations in hydrothermal and volcanic systems, thermohydrodynamic-geochemical-geomechanical modeling, applications for assessing geothermal resources, forecasting catastrophic hydrothermal processes, volcanic eruptions and the strongest earthquakes"), using the resources of the Shared Use Center of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences "Kamchatka Center for Elemental, Mineral, and Isotopic Analysis".

Acknowledgements. The authors are sincerely grateful to Dmitry P. Gladkochub, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Director of the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia), for his comprehensive support of the research idea, consultations, and valuable comments; to Aleksey Yu. Ozerov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Director of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia), for the discussion and for the photographs of samples with hydrovolcanic phenomena kindly provided for this article.

For citation: Vakhromeev A.G., Danilova M.A., Misyurkeeva N.V., Sergeeva A.V., Kiryukhin A.V., Mamakov D.O. et al. Magmatogenic-hydrothermal formation model of fluid dynamic structures and rare metal brine deposits in Siberian Platform cover. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(2):?-?. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-7>. EDN: TIUGOQ.

Введение

Известно, что ключом к раскрытию загадки флюидодинамических структур является комплексный анализ истории геологического развития вулканогенно-осадочного чехла кратона в докембрии и фанерозое. Такие структуры регулярно наблюдаются в материалах 2D- и 3D-сейсморазведки на многих разведочных площадях юга Сибирской платформы.

Изучению геологии и геохимии платформенного магматизма трапповых интрузий Сибирской платформы посвящены работы В.С. Обручева, И.И. Краснова, В.С. Масайтиса, М.М. Одинцова, Г.М. Левинсона-Лессинга, Л.Г. Страхова, Г.Д. Феоктистова, А.И. Альмухамедова, А.Я. Медведева и многих других геологов. В конце палеозоя – начале триаса на территории Сибирской платформы активно проявилась фаза основного магматизма [1–4 и др.]. Наиболее распространенным является мнение о поступлении магматических расплавов, сформировавших долеритовые интрузии – силлы, из Канско-Тасеевской впадины – очаговой зоны траппового магматизма по моноклиальному падению пород. В пределах Иркутской области выделен ряд наиболее крупных интрузивов, залегающих в нижней части осадочного чехла, среди которых Окинский, Купский, Вихоревский, Братский, Седановский, Тубинский, Тушамский, Средне-Ангарский, Верхнее Катанский, Усольский силлы. По петрографическим, минералогическим и структурным признакам во всех интрузиях условно выделены три морфологических

зоны: центральная (или надкорневая) зона, периферическая и зона выклинивания. Центральная зона силлов имеет истинную толщину до 250 м; периферическая – от 50 до 100 м, приспособившаяся к общему простиранию слоистой галогенно-карбонатной толщи; толщина зон выклинивания – до 50 м. В работе Д.П. Гладkochуба с соавторами [5] для южного фланга Сибирского кратона обосновано выделение трех основных этапов плюмового фанерозойского базитового магматизма (500, 275–290, 240–245 млн лет). Трапповый магматизм раннего мезозоя на юге Сибирского кратона проявлен многочисленными базитовыми интрузиями Ангаро-Тасеевской синеклизы, включая Усольский силл с возрастом 240–245 млн лет.

По аналогии с вулканогенными областями современного вулканизма – Восточной Камчаткой, Курилами, Новой Зеландией – внедрение в верхнюю кору раскаленного до 1200 °С расплава базальтовой магмы привело к формированию промежуточных магматических очагов в осадочном чехле Сибирского кратона [3, 6–8]. Физической основой процесса взаимодействия расплава базальтовой магмы, вмещающих осадочных пород нижнекембрийских эвапоритов осадочного чехла и подземных вод глубоких горизонтов – рассолов [9] – является высокотемпературное воздействие поступавшего из мантии базальтового расплава [3, 4, 6, 10–12]. Система водных растворов солей – природных хлоридных рассолов – считается первой, наиболее активно реагиру-



ющей на изменение температурных условий при взаимодействии с магмой [12–16].

На территории юга Сибирской платформы массовое внедрение базальтового расплава в надочаговые пространства по системе глубинных магмоподводящих разломов – на уровне нижнекембрийского карбонатно-галогенного комплекса пород осадочного чехла – шло с образованием расщепленных по флангам магматических периферических камер. Термическое воздействие расплава на боковые породы сопровождалось грануляцией, радикальным проникновением по наименее устойчивым слоям, то есть послойно. Формировались сопряженные с ними субгоризонтальные зоны. В центральной части структуры имело место «полное ожигание вмещающей эвапоритовой толщи, интенсивное смешение вновь возникшего карбонатно-солевого расплава с гранулированным силикатным, сопровождаемое выделением рудной фазы» [11]. Все процессы шли под экраном вышележащей галогенной толщи.

На последующей стадии происходил гидравлический разрыв пласта (ГРП) силикатно-карбонатной и рудно-карбонатной эмульсионными смесями в послойные трещины с образованием силлообразных тел. Внедрение эмульсий в осадочной толще протекало при постоянном подтоке рассолов глубоких горизонтов осадочного чехла, то есть при участии водной фазы. Опережая магму, на этой глубине благодаря парогазовому фронту формировался горизонт/слой водно-соляных отложений, состоящих преимущественно из галита и его насыщенного раствора [17]. Более поздним по отношению к магматическому этапу является гидротермально-метасоматический этап. В последнее время этот этап на месторождениях Ангарской провинции считается ведущим в рудообразовании, поэтому связанным с ним процессам посвящен целый ряд специальных исследований [2–4, 18, 19]. Так, монография А.И. Альмухамедова, Г.В. Нестеренко [19] посвящена изучению геохимии редких элементов в процессах дифференциации базальтовой магмы. Работа выполнена на примере траппов Сибирской платформы. В ней показаны основные геохимические закономерности распределения, форм нахождения и поведения 28 элементов, характерных как для основной магмы

(элементы группы железа), так и для других типов магм (серебро, цинк, свинец, литий, рубидий, стронций, барий, тантал, ниобий и др.). Отметим, что роль глубинных флюидодинамических процессов миграции флюидов, а также процессы рудопереноса в земной коре рассмотрены с разных позиций многими известными геологами – И.М. Губкиным, Ф.А. Летниковым, Ж.В. Семинским, Э.Б. Чекалюком, Л.А. Абуковой, Н.А. Кудрявцевым, А.Н. Дмитриевским, А.А. Неждановым, А.В. Мигурским, В.И. Никулиным.

Целью настоящей работы является обоснование вулканогенно-геотермальной модели формирования флюидодинамических структур, которые фиксируются по результатам детальных сейсморазведочных работ методом объемной сейсморазведки и по данным глубокого бурения в толще осадочного чехла, на примере изученной территории юга Сибирской платформы. С определенной долей условности вслед за Ю.А. Загоровским¹, А.А. Неждановым [20] мы выделяем два типа флюидодинамических структур:

- субвертикальные, хорошо изученные структуры повышенной проницаемости тектоносферы в сочетании с глубинными коровыми разломами [21, 22], структуры диатремовой ассоциации и «трубок взрыва» – как правило, это сквозные гидрогеологические структуры в верхнем структурном этаже платформы, дренировавшие чехол или его часть;

- субгоризонтальные и слабо наклонные зоны активного карстово-трещинного коллектора, к которым приурочены многочисленные «рапа-силлы», диагностированные по высокодебитным притокам из глубоких скважин предельно насыщенных магниевых-кальциевых металлоносных поликомпонентных рассолов с аномально высоким пластовым давлением, сопоставимым по величине с горным давлением на этих глубинах.

Материалы и методы исследования

В работе использованы архивные и новейшие материалы по сейсмо- и электроразведке, массивы геопромысловых данных глубокого бурения, гидрогеохимического опробования рассолов. Для того чтобы максимально учесть значимые масштабные геодинамические про-

¹ Загоровский Ю.А. Роль флюидодинамических процессов в образовании и размещении залежей углеводородов на севере Западной Сибири: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.12. Тюмень, 2017. 201 с.



цессы, повлиявшие через магмо-флюидные потоки в верхнюю кору [23] на формирование флюидодинамических структур в осадочном чехле Сибирской платформы, авторы по методу аналогий привлекли опыт изучения геотермальных полей [6, 24, 25 и др.] современных магматических и высокотемпературных гидротермальных систем Восточной Камчатки (Россия). Крайне важны экспериментальные данные, на основании которых сделаны выводы, что испарение воды – растворителя – с течением времени является основой для концентрации лития в рассолах, в то время как высокотемпературные пневматолитово-гидротермальные процессы являются ключевыми для формирования месторождений литиевых рассолов с низким соотношением магния и лития [12].

Результаты исследования и их обсуждение

Процесс проработки толщи осадочного чехла Сибирской платформы гидротермами, протекавший как во время, так и после катастрофического периода активной базитовой вулканической деятельности, был весьма длительным и по некоторым оценкам занимал до 60 млн лет [7]. Под гидротермами авторы понимают как мантийную и коровую составляющие дегазации магм, так и хлоридные флюиды – рассолы глубоких горизонтов осадочного чехла, вовлеченные в активную циркуляцию в палеопроцессах термолифта [25]. Гидротермы мантийного и корового генезиса формировали зоны активной фильтрации – «гидрогеологические окна», в которые поступали нижние (по отношению к положению промежуточного магматического очага) гидродинамические системы подземных вод глубоких горизонтов осадочного чехла (рассолы). Накопление пластового давления под галогенными экранами привело к инъективному внедрению гидротерм в трещинные резервуары осадочного чехла и активизации процессов авто-гидроразрыва (авто-ГРП), они также в значительных объемах разгружались в поверхностные водотоки, поступали в Мировой океан [16]. Региональная толща кембрийского солеродного бассейна [26] сыграла роль регионального флюидоупора. Межсолевые трещинные карбонатные пласты-коллекторы толщи венда – кембрия и раннего кембрия на Сибирской платформе как сложная дренажно-канальная система выступили важнейши-

ми факторами процесса перераспределения высоконапорных гидродинамически активных флюидных систем.

По этой модели при внедрении жидкой высокотемпературной (до 1200 °С) базитовой магмы в галогенно-карбонатно-вулканогенную толщу чехла солеродного бассейна были сформированы флюидодинамические структуры. По Ю.А. Загоровскому¹, А.А. Нежданову [20], к флюидодинамическим процессам относятся миграцию (движение) флюидов в недрах Земли. Свидетельствами струйной миграции через покрывки считают флюидодинамические аномалии сейсмической записи, связывая их с нефтегазоносностью и аномально высоким пластовым давлением флюидных систем верхней коры.

Сегодня применение новых технологий геофизических методов разведки месторождений нефти и газа позволило геологам по-новому взглянуть на эти территории с длительной, сложнейшей историей геологического развития, на ряд объектов с неясным пока генезисом. Одна из задач, которая требует объяснения, решения и геологической трактовки – так называемые «флюидодинамические структуры», которые фиксируются (рис. 1) по результатам детальных сейсморазведочных работ объемной сейсморазведки в толще осадочного чехла. Флюидодинамические структуры детализированы по материалам широкоазимутальной 3D-сейсморазведки [27], в том числе с использованием инструментов искусственного интеллекта.

По одной из гипотез, флюидодинамические структуры представляют собой объемно-плоскостные субвертикальные или наклонные до субгоризонтальных каверново-трещинные разломные зоны, зоны разуплотнения [28–30], которые на этапах тектоно-магматической активизации кратона предположительно являлись каналами глубинной дегазации [20]. С флюидодинамическими структурами зачастую также связаны зоны развития локальных структурно-вещественных неоднородностей – мульды проседания – в галогенно-карбонатной толще осадочного чехла. Их возникновение, по одной из гипотез, определяется проявлением глубинного соляного карста [7, 31, 32] в результате «гидровруба» – латерального движения разбавленных подземных вод по одному из регионально выдержанных флюидоносных горизонтов в основании карстующейся толщи, здесь – предположительно,

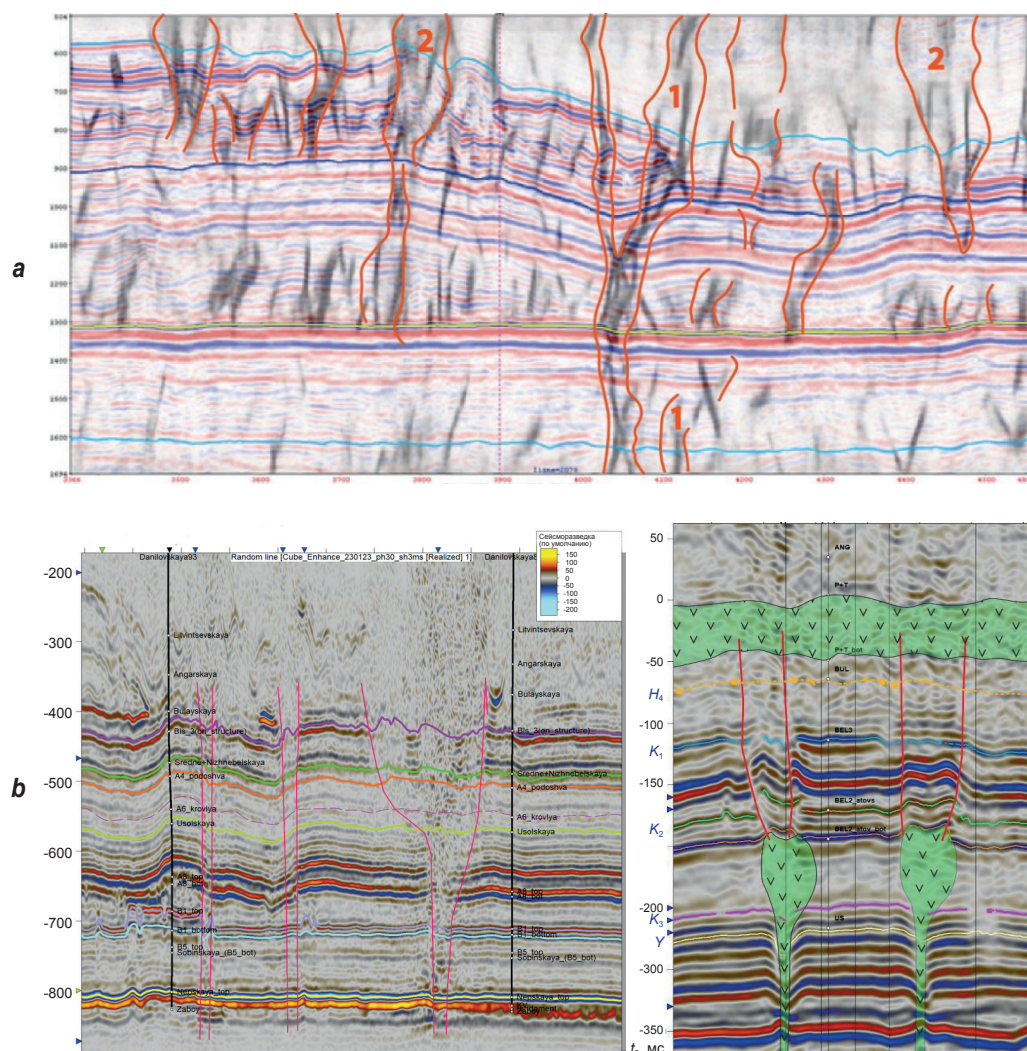


Рис. 1. Флюидодинамические структуры на временном разрезе сейсморазведочных работ методом общей глубинной точки (интерпретация А.В. Левина):

a – фрагмент временного разреза с Ковыктинской площади, Ангара-Ленская ступень:

1 – сквозные флюидодинамические структуры,

2 – флюидодинамические структуры, локализованные в галогенно-карбонатном этаже;

b – фрагменты временных разрезов с вулканическими аппаратами/трубками взрыва с Непского свода, Непско-Ботуобинской антеклизы по данным геолого-разведочных работ на нефть и газ (показаны прогнозируемые «сквозные» флюидодинамические структуры в осадочном чехле; в зоне примыкания нормально-осадочного разреза сформированы мульды проседания толщи)

Fig. 1. Fluid-dynamic structures on the time section of seismic exploration using the common depth point method (A.V. Levin's interpretation):

a – fragment of the time section from the Kovyktinskaya area, Angara-Lena stage:

1 – through fluid dynamic structures, 2 – fluid dynamic structures localized in the halogen-carbonate floor;

b – fragments of time sections with volcanic apparatuses/explosion pipes from the Nepa dome, Nepa-Botuoba antecline, according to geological exploration data for oil and gas (predicted “through” fluid dynamic structures in the sedimentary cover are shown; subsidence troughs of the strata are formed in the junction area of normal sedimentary section)

осинскому [32]. Эта гипотеза опирается на факт внедрения гигантского Усольского силла по осинскому горизонту или, на некоторых участках, в непосредственной близости под либо над ним [27, 30, 32]. Субвертикальные флюидодинамические структуры служили каналами миграции глубинных флюидов, что привело к локализации гидротермальной раз-

грузки – парогидротерм в постмагматические этапы континентального магматизма.

В последующем рассматриваемые флюидодинамические структуры сохранились как реликты ГРП-прорыва парагазового фронта вскипавших рассолов – «рапа-силлы» [13, 14], а также транзитных путей длительной разгрузки гидротермальных флюидов и стали тригге-



ром формирования вторичных высокочемких карстово-трещинных резервуаров.

Диагностическими признаками отнесения наблюдаемых в осадочном чехле структурно-вещественных неоднородностей к флюидодинамическим структурам авторы считают совокупность линейных трещин и мелких «газовых труб», которые из-за небольших размеров не всегда видны в сейсмическом волновом поле, но признаки флюидодинамических структур отмечаются по геопромысловым данным глубокого бурения, по данным электроразведочных работ по наличию/отсутствию аномально-гидропроводных коллекторов.

Так, на рис. 2 приведена схема районирования северо-западного крыла Жигаловского вала, ближней к Усольскому силлу мегаструктуры в осадочном чехле [33]. Синим цветом выделены мозаично-овальные контуры флюидонасыщенного пустотного (емкостное и транзитное) пространства прогнозируемых мульд проседания в межселевых карбонатных трещинных породах-коллекторах кембрийского макрорезервуара. Две мульды вскрыты глубокими скважинами, получены притоки предельно насыщенных рассолов из прогнозируемых «рапа-силлов».

Конкретная форма, внутреннее строение флюидодинамических структур определяются мощностью и другими параметрами формиру-

ющего флюидного потока, также прочностными свойствами пород, в которых образуются флюидодинамические структуры, их тектонической дислоцированностью и трещиноватостью. По сути, флюидодинамическая интерпретация геофизических данных заключается в извлечении информации о движении подземных флюидов и формировании их скоплений в осадочном чехле².

В Ангаро-Ленской ступени и одноименном артезианском вулканогенно-осадочном бассейне развита интрузивная гипабиссальная фация пластовой формы, представленная долеритами – Усольский (рис. 3) и другие силлы. Его строение охарактеризовано по материалам более чем 400 скважин, а также данным региональной и детальной сейсморазведки. Занятая им площадь превышает 300000 км² и это, видимо, самое обширное из известных на Земле пластовых трапповых тел; по А.В. Мигурскому [34], «это самый известный пластовый трапп». Удаленность границы выклинивания Усольского силла от очаговой области (центральная часть Присяно-Енисейской синеклизы) достигает 500 км и более. Амебообразная в плане форма силла имеет крупные заливообразные контуры и ступенчатые подъемы по гипсометрии и стратиграфии по мере удаления от очага внедрения. На рис. 3 показаны основные поля трапповых силлов, Усольский силл, скопления

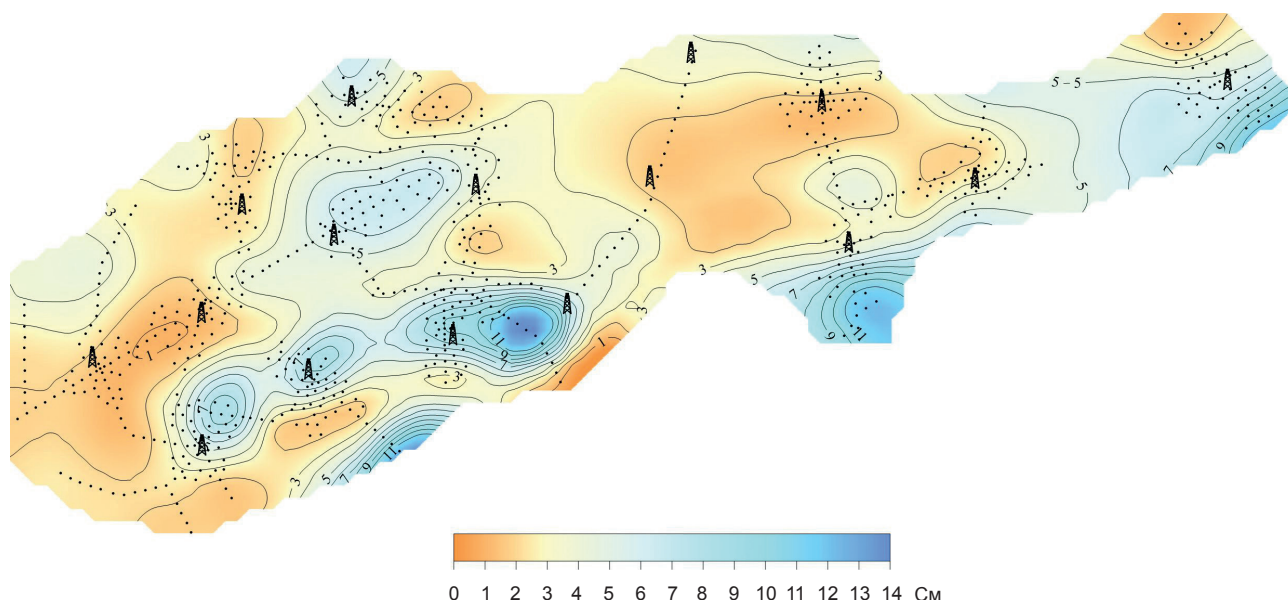


Рис. 2. Схема районирования северо-восточного крыла Жигаловского вала по наличию/отсутствию аномально-гидропроводных коллекторов (по данным геолого-разведочных работ) [33]

Fig. 2. Zoning scheme of the northeastern flank of the Zhigalovsky swell based on the presence/absence of anomalous hydraulic reservoirs (based on geological exploration data) [33]

² Нежданов А.А., Смирнов А.С. Флюидодинамическая интерпретация сейсморазведочных данных: учеб. пособие. Тюмень: Изд-во ТИУ, 2021. 286 с.

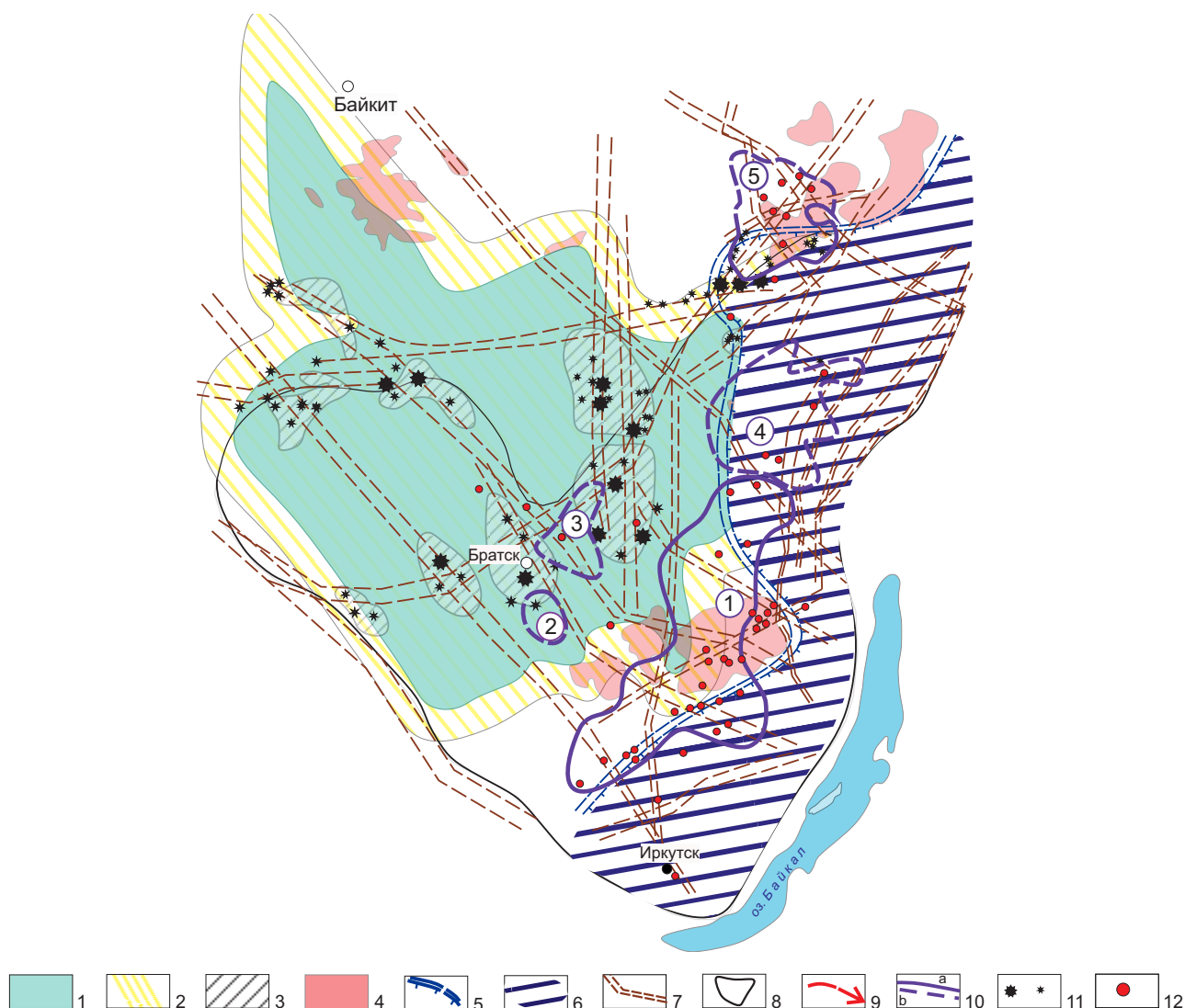


Рис. 3. Зональные магматические ареалы как металлогеническая основа формирования рудных узлов и месторождений редкометалльных промышленных рассолов в осадочном чехле гидроминеральной провинции Сибирской платформы, Ангара-Ленский артезианский бассейн (составили: М.А. Данилова, А.В. Левин, А.Г. Вахромеев, А.В. Ощепкова, С.К. Квачко):

1 – Усольский силл; 2 – прогнозируемая область разгрузки пародоминирующих гидротермальных флюидных систем; 3 – железорудные районы как зоны питания глубинными флюидными системами; 4 – месторождения углеводородов в чехле; 5 – фронтальная область (форланд) Байкало-Патомского складчато-надвигового пояса; 6 – Байкало-Патомский складчато-надвиговой пояс; 7 – рудоконтролирующие коровые разломы фундамента; 8 – контур Ангара-Ленского артезианского бассейна; 9 – направления разгрузки пародоминирующих гидротермальных систем; 10 – установленные (а) и прогнозируемые (б) контуры месторождений редкометалльных рассолов: 1 – Ангара-Ленского, 2 – Карахунского, 3 – Братско-Ковинского, 4 – Ярактинского, 5 – Даниловско-Преображенского; 11 – «трубки взрыва – диатремы» как гидрогеологические «окна» субвертикальной циркуляции флюидов; 12 – глубокие скважины с притоками промышленных редкометалльных рассолов (согласно источникам [21, 22, 32] с дополнениями авторов)

Fig. 3. Zonal igneous areas as metallogenetic basis to form ore clusters and deposits of rare-metal industrial brines in the sedimentary cover

of the hydromineral province of the Siberian Platform, Angara-Lena artesian basin (compiled by: M.A. Danilova, A.V. Levin, A.G. Vakhromeev, A.V. Oshchepkova, S.K. Kvachko):

1 – Usolsky sill; 2 – predicted discharge area of steam-dominated hydrothermal fluid systems; 3 – iron ore areas as recharge zones of deep-seated geofluid systems; 4 – hydrocarbon deposits in the cover; 5 – frontal area (foreland) of Baikal-Patom fold-thrust belt; 6 – Baikal-Patom fold-thrust belt; 7 – ore-controlling crustal faults of the basement; 8 – contour of the Angara-Lena artesian basin; 9 – discharge directions of vapor-dominated hydrothermal systems; 10 – identified (a) and predicted (b) contours of rare metal brine deposits: 1 – Angara-Lena, 2 – Karakhunsky, 3 – Bratsko-Kovinsky, 4 – Yarakinsky, 5 – Danilovsko-Preobrazhensky; 11 – “explosion pipes – diatremes” as hydrogeological “windows” for subvertical fluid circulation; 12 – deep wells with inflows of industrial rare-metal brines (according to the sources [21, 22, 32] with authors’ additions)



углеводородов, известные и прогнозируемые месторождения редкометалльных рассолов. Показана позиция рассолопроявляющих скважин и прогнозируемых рудных узлов локализации «жидкой» редкометалльной руды и месторождений относительно коровых разломных зон, флюидопроницаемых в этапы тектономагматической активизации, и предполагаемых направлений палеофильтрации парогидротерм относительно магматических тел Усольского силла, вулканических аппаратов центрального типа – «трубок взрыва». Приведенная схема отражает важнейшие этапы металлогении этого типа литиеносного сырья – редкометалльных промышленных рассолов. Разгрузка пневматолитово-гидротермальных систем шла от апикальной области силла по субгоризонтальным каналам фильтрации надвиговых пластин аллохтона Марковско-Ичерского сектора (на рис. 3 в направлении на север и северо-восток).

Силлы, флюидодинамические структуры и вулканические трубки взрыва в пределах распространения Усольского и Мотского силлов выделяются по данным 2D- и 3D-сейсморазведки на юге Сибирской платформы: на рис. 4 приведен сейсмогеологический разрез вкрест простираения аллохтонной антиклинали [27].

Рассматривая особенности геологического строения гигантского по площади пластового магматического траппового тела – Усольского силла, его краевую область и площадь осадочного чехла над ним в галогенно-карбонатной толще раннего кембрия (см. рис. 3), отметим, что в южной и юго-восточной частях Ангаро-Ленской ступени Усольский силл прослежен на Правобережной, Жигаловской, Грузновской, Ковыктинской, Чиканской, Омолуйской и Усть-Кутской площадях [32]. На этой территории траппы залегают в низах усольской свиты – под осинским горизонтом, прорывают осинский горизонт по напластованию либо находятся на нем. В восточной части (на Правобережной, Грузновской, Жарковской, Ковыктинской и Чиканской площадях) – под осинским горизонтом. Далее, к востоку от Ковыктинской площади трапповое тело отсутствует (см. рис. 3, а). Здесь прогнозируется (см. рис. 3) Ангаро-Ленское месторождение промышленных рассолов [32, 35], разведка которого в настоящее время идет на Знаменском, Верхоленинском, Ковыктинском и Омолуйском участках.

Северо-западнее, на Чорской площади в скважине 1 траппы залегают под осинским

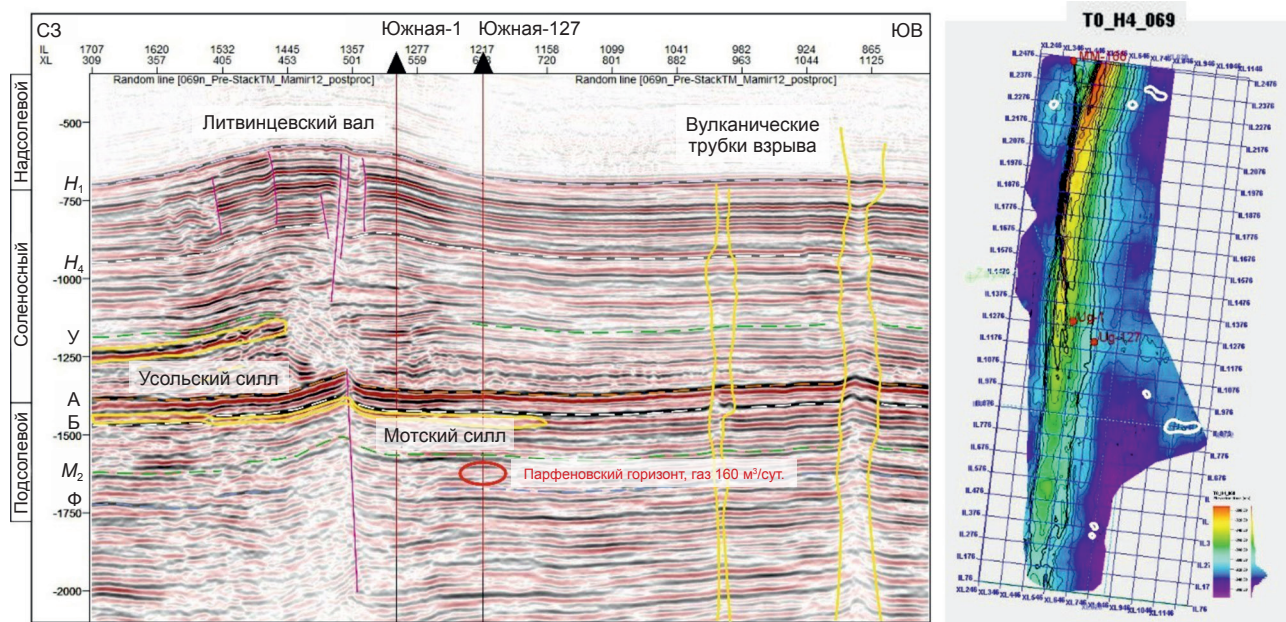


Рис. 4. Флюидодинамические структуры и вулканические трубки взрыва в пределах распространения Усольского силла на юге Сибирской платформы (по данным геолого-разведочных работ) [27]:

а – отображение волновой картины на Мамырском участке недр (Мамырский-1, -2);
b – предварительное расположение трубок взрыва по кубу после временной миграции до суммирования

Fig. 4. Fluid-dynamic structures and volcanic eruption pipes within Usolsky sill distribution in the south of the Siberian platform (based on geological exploration data) [27]

а – wave pattern display at the Mamyrsky subsurface site (Mamyrsky-1, -2);
b – preliminary location of eruption pipes in a cube after prestack time migration



горизонтом, а в скважинах 2 и 115 они расположены над осинским горизонтом. Западнее, на Карахунской и Родионовской площадях базитовый силл «рвет» осинский горизонт. Здесь в скважине 2 Карахунской в процессе бурения получен фонтанный приток концентрированного рассола с сероводородом дебитом около 2000 м³/сут., прогнозируется (см. рис. 3) одноименное месторождение промышленных рассолов.

На Ковыктинской и Чиканской площадях по скважинным данным, керновым и промыслово-геофизическим исследованиям трапповый силл установлен в скважинах ЮК-1, ЮК-2, Чик-22, Ков-62. Мощность магматических тел в скважинах: Правобережная 1 – 10 м, Чик-23 – 19,3 м, Чик-14, Чик-21 – 70,1 м. Максимальная мощность вскрытых отложений на юго-западе в скважине Грузновская 1 (123 м), близкие значения мощности в скважинах по данным бурения выявлены в скважинах Грузновская 134 (105 м), Жарковская 133 (118 м). Минимальная – в скважинах Правобережная 1 (10 м) и Жигаловская 1 (1 м). По вещественному составу интрузивное тело представлено преимущественно долеритами, реже габбро-долеритами. Так, в скважине Ков-62, по материалам геофизических исследований, трапповые образования вскрыты в интервале пласта 2586,6–2652,2 м, по описанию керна и шлама интервал представлен долеритами от темно-серых до черных, мелкокристаллическими, крепкими с прослоями доломитов.

Таким образом, уникальное Ковыктинское газоконденсатное месторождение-гигант в восточной части характеризуется сложным двухъярусным строением вулканогенно-осадочного чехла³ [32, 35] и осложнено трапповым силлом в западной, северо-западной части территории (рис. 5). Авторы работы [30] предположили следующее: «Возможно, мощный сплошной доломитовый пласт (осинский горизонт) являлся для высокотемпературной (1100–1200 °С) трапповой магмы труднопреодолимым препятствием. В зонах разуплотнения и повышенной трещиноватости осинского горизонта трапповая магма перетекла по тектоническим зонам в надосинскую часть разреза».

В то же время в этой модели процессы взаимодействия магмы и природных рассолов

осинского горизонта, авто-ГРП и внедрения парогазового фронта не рассмотрены, хотя они характерны для магматического этапа развития верхней коры. Подчеркнем: здесь, на этапе внедрения долеритовой магмы осинский горизонт находился в области формирования пародоминирующего резервуара. Такие процессы имеют место на объектах-аналогах, например на Камчатке [6, 24, 25].

По А.В. Кирюхину [6], в условиях горизонтального сжатия коры активные вулканы являются инжекторами воды и магмы в прилегающие геофлюидные резервуары, формируют высокотемпературные гидротермальные системы (например, Мутновский вулкан). Именно геодинамические условия горизонтального сжатия характерны для каледонского этапа в интервале средней, галогенно-карбонатной толщи раннего кембрия [3, 32, 34] этой территории.

Авторы сопоставили известные гипотезы формирования рассолов Сибирской платформы [15, 16, 36], рудных тел Ангара-Илимского типа, Норильского рудного узла [4, 19], минерогенические концепции [33], плюм-гипотезу [37]. Такое сопоставление натолкнуло на возможную модель не только эксплозивного [33], но и вероятного мощного, длительного вторичного палео-гидротермального образования рассматриваемых флюидодинамических структур – объектов в осадочном чехле [13, 14, 32, 38, 39]. Основанием такой модели послужило, с одной стороны, сопоставление геопромысловых данных бурения (см. рис. 5) и сейсморазведочных работ на территории Ангара-Ленского артезианского бассейна, гидрохимических исследований проб концентрированных рассолов [9, 40], экспериментов процесса взаимодействия «вода – порода» при температурах выше температуры кипения и до закритических [12], с другой – сопоставление детальных геодинамических моделей шарьяжно-надвиговой тектоники [32], а также результаты исследований современных и палео-гидротермальных систем [6, 8, 25, 39], детализация строения трапповых силлов и вулканических аппаратов центрального типа, их соотношения с первично-осадочными породами чехла по данным сейсморазведочных работ и глубокого бурения на исследуемой территории [27, 30, 41, 42].

³ Мисюркеева Н.В. Складчато-надвиговое строение осадочного чехла юго-восточной окраины Сибирского кратона (Ковыктинско-Хандинская зона): дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.03. Иркутск, 2022. 140 с.

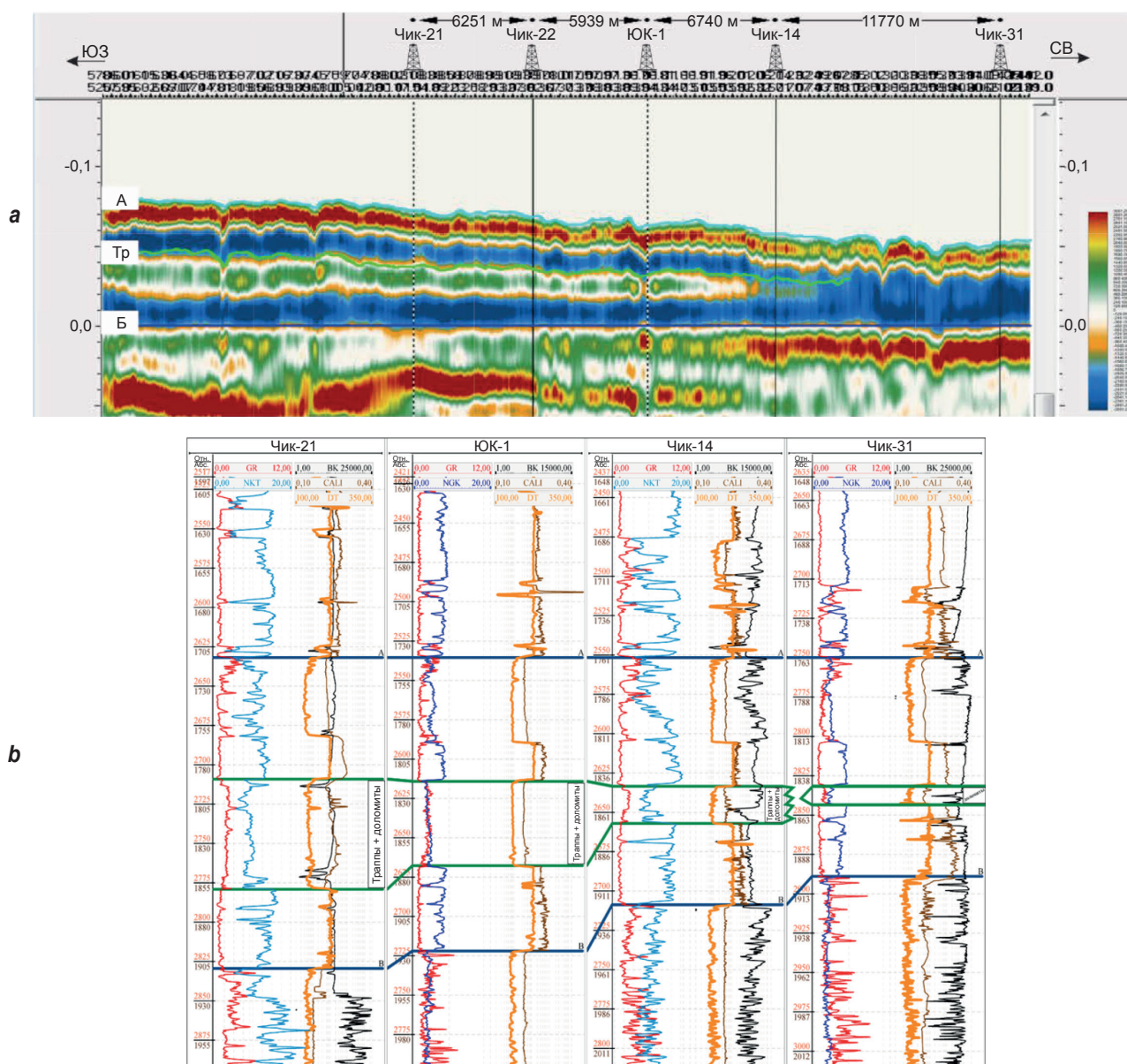


Рис. 5. Детализация геологической модели краевой апикальной области в юго-восточном замыкании Усольского силла по данным геолого-разведочных работ (бурение, геофизические исследования, временной разрез сейсморазведочных работ методом общей глубинной точки) на Ковыктинской площади [27, 30]:

a – в плане (А – кровля осинского горизонта, Б – кровля тэтэрской свиты, Тр – трапповое тело);
b – фрагмент корреляции данных геофизических исследований по линии скважин Чик-21, ЮК-1, Чик-14, Чик-31, выровненный на кровлю осинского горизонта (характеристики волнового поля в районе выклинивания усольского траппового тела, сейсморазведка)

Fig. 5. Detailing of the geological model of the marginal apical region in the southeastern closure of the Usolsky Sill according to geological exploration data (drilling, geophysical surveys, time section of seismic surveys using the common depth point method) on Kovyktinskaya square [27, 30]:

a – in the plan (A – the roof of the Osinsky horizon, B – the roof of the Teter formation, Tr – trap sills);
b – fragment of geophysical research data correlation the line of wells 21CHI, 1UKV, 14CHI, 31CHI aligned with the roof of the Osinsky horizon (characteristics of the wave field in the wedging area of the Usolsky sill, seismic survey)

Если ряд наблюдаемых флюидодинамических структур действительно сформирован в процессах активной фильтрации флюидов в осадочном чехле, то должно быть подтверждение этим процессам на вещественном

уровне, в образцах горных пород. По данным доктора геолого-минералогических наук, члена-корреспондента Российской академии наук А.Ю. Озерова, важным аргументом формирования проницаемых участков траппового тела



являются линейно-проницаемые участки, представленные «дорожками поровых каналов» на образцах долеритов (рис. 6, а). Эти участки отражают процесс «гидровулканизма» – прорыва перегретой пароводяной смеси сквозь жидкую магму [43]. Данное явление свидетельствует о значительном по величине давлении парогазовых струй пародоминирующего резервуара [24] ниже контактной области с магмой, формирующих каналы вертикальной фильтрации флюидов в толще площади расплава будущего траппового силла. На рис. 6, б отражено явление интенсивного карста в образце керна, отобранного из осинского горизонта в одной из скважин Непско-Ботуобинской антеклизы, переотложение расплава галита в кавернах и карстовых полостях.

Действительно, описываемые нами флюидодинамические структуры (см. рис. 1, 4) фиксируются в двух областях. Часть флюидодинамических структур наблюдается над силлом в поле его распространения. Другая их часть смещена от проекции контура (силла) и расположена в полосе (см. рис. 3), огибающей в плане краевые, апикальные части Усольского силла. Одновременно она захватывает

фронтальную область шарьяжно-надвиговой складчатости аллохтона Байкало-Патомского складчато-надвигового пояса, располагаясь в области предполагаемого фронта основных надвиговых секторов [13, 14, 32]. Усольский силл, активное внедрение которого устанавливается в пермо-триасе, по контуру ограничен форландом, или его внедрение остановилось на некотором удалении от форланда (см. рис. 3). Внедрение магмы шло по осинскому горизонту с северо-запада на юго-восток, вверх по восстанию. Отметим длительность до 60 млн лет [11] работы гидротерм, циркулировавших по разуплотненным приконтактным зонам от основания магматических тел. Гидротермы, парогазовые струи и высокотемпературные фумаролы с температурой до 400–650 °С [4, 12, 44] способствовали преобразованию и перемещению растворенного вещества в кавернозно-трещиноватой толще карбонатных прослоев раннего кембрия. Вследствие этого формирование субвертикальных зон разгрузки флюидов привело к разуплотнению соляно-карбонатной толщи и развитию наложенных структур проседания (рис. 7) по модели глубинного соляного карста [31, 32].

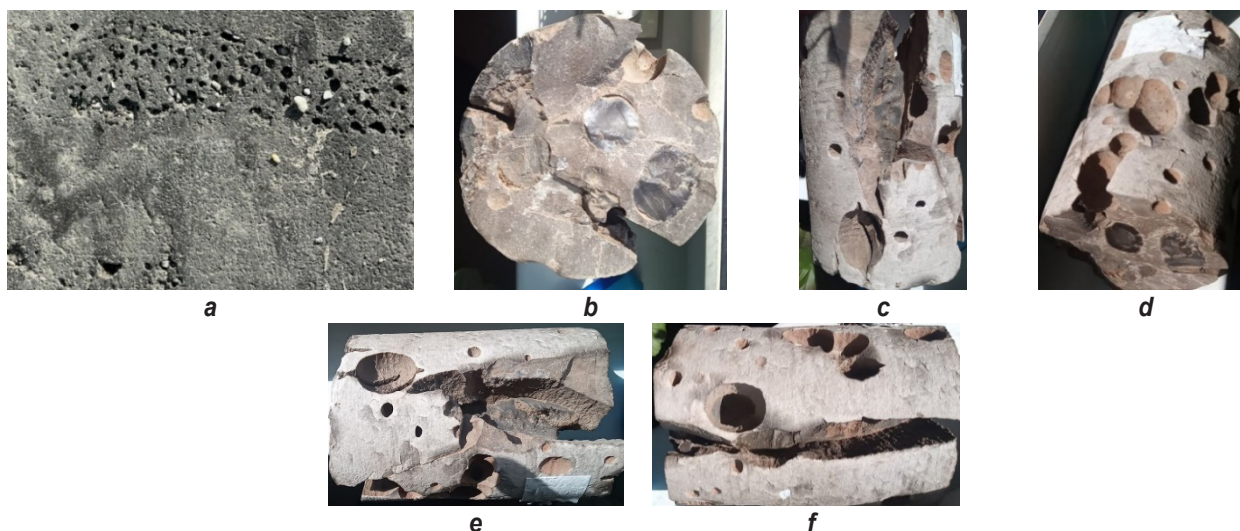


Рис. 6. Отражение активной палеофильтрации флюидов в осадочном чехле на вещественном уровне в образцах горных пород:

- а – гидровулканизм, линейно-проницаемые участки, представленные «дорожками» поровых каналов на распиленных образцах долеритов (фото А.Ю. Озерова, 2024 г.);
б – проявление интенсивного карста в образце керна, отобранного из осинского горизонта;
с–ф – переотложение черной вулканической переплавленной соли в кавернах и карстовой полости (фото А.Г. Вахромеева, 2025 г.)

Fig. 6. Reflection of active paleofiltration of fluids in the sedimentary cover at the material level in rock samples:

- а – hydrovolcanism, linearly permeable areas represented by the “paths” of pore channels on the sawn dolerite samples (photo by A. Yu. Ozerov, 2024);
б – manifestation of intense karst in a core sample taken from the Osinsky horizon;
с–f – redeposition of black volcanic remolten salt in caverns and in the karst cavity (photo by A. G. Vakhromeev, 2025)

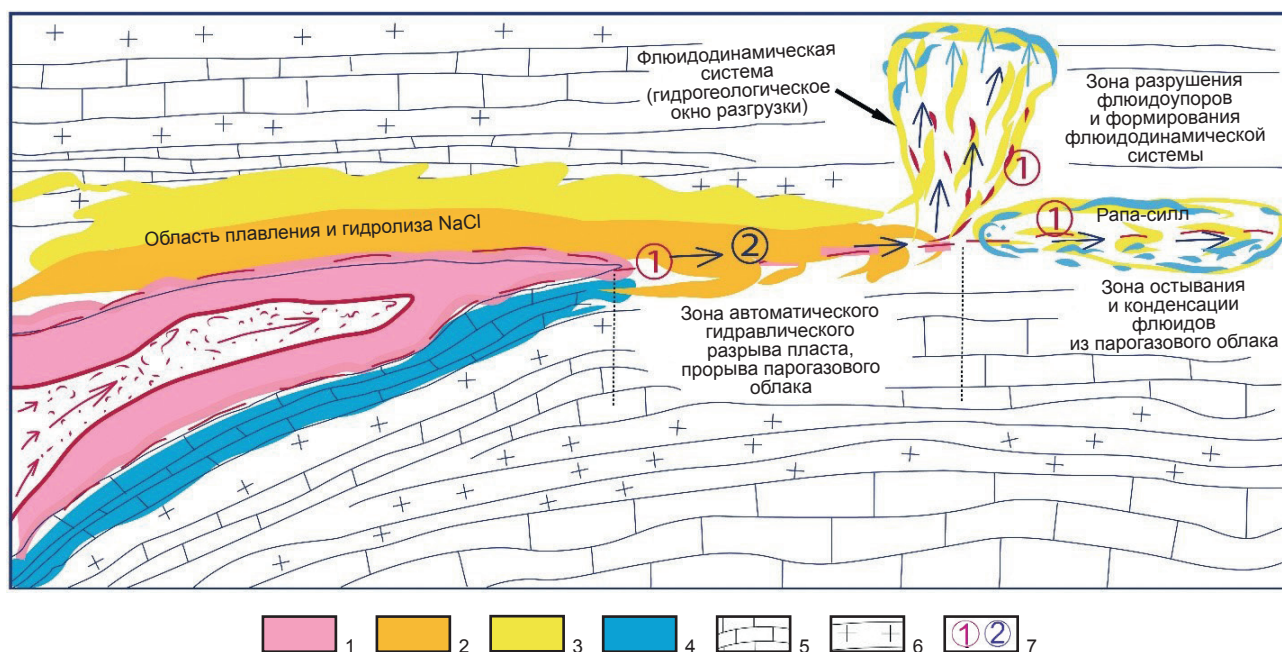


Рис. 7. Модель и основные этапы развития области воздействия базитового магматического расплава на осадочные породы и флюидные системы осадочного чехла с обозначением областей (по данным А.Г. Вахромеева, М.А. Даниловой, А.В. Левина, С.К. Квачко, А.В. Сергеевой):

1 – область магмы; 2 – область плавления и гидролиза солей; 3 – область пародоминирующего резервуара, горячей (до 100 °С) жидкой фазы рассолов; 4 – область перетока рассолов с нижних уровней разреза чехла в зону магматического прогрева, флюидодинамическая структура – область субвертикального разуплотнения и разгрузки на земную поверхность; 5 – карбонатные межсольевые резервуары; 6 – слои галита; 7 – зона вскипания и перехода (1) в сверхкритическое состояние водной фазы (2); рапа-силл – область сформированного «рапа-силла»

Fig. 7. Model and main development stages of the influence area of basic igneous melt on sedimentary rocks and fluid systems of sedimentary cover with area designation (according to A.G. Vakhromeev, M.A. Danilova, A.V. Levin, S.K. Kvachko, A.V. Sergeeva):

1 – magma area; 2 – area of salt melting and hydrolysis; 3 – area of vapor-dominated reservoir, hot (up to 100°C) liquid phase of brines; 4 – area of brine flow from lower levels of the cover section in the magmatic heating area, fluid dynamic structure – area of subvertical decompression and discharge to the Earth's surface; 5 – carbonate intersalt reservoirs; 6 – halite layers; 7 – area of boiling and transition (1) to a supercritical state of the aqueous phase (2); rapa sill – area of the formed "rapa sill"

В рамках магматогенно-тектонической гидротермальной модели преобразования толщи осадочного чехла апикальной области Усольского силла последний рассматривается нами как гигантское по площади магматическое тело, внедрение магмы которого около 250 млн лет назад кардинально повлияло на переформирование карбонатных коллекторов и сформировало вторичные, многократно перекипевшие залежи предельно насыщенных литиеносных рассолов в этих коллекторах, то есть импульсно активизировало процессы концентрирования хлоридных рассолов, накопление в них редких рассеянных элементов и минеральных солей. Кипение рассолов приводило к переходу воды в паровую фазу [12, 45] и удалению растворителя из хлоридной системы, в результате чего происходило концентрирование солей по эвтектике [46].

Таким образом, процесс импульсного переформирования каверново-трещинных систем межсольевых карбонатных коллекторов – резервуаров высококонцентрированных рассолов – можно схематично описать следующими этапами (см. рис. 7):

1. При внедрении магмы и формировании магматического очага во фронтальной части будущего силла в под- и надосинской частях усольской свиты сформировалось парогазовое облако сверхкритической жидкости с температурой более 374 °С, а над ним (400–650 °С) – сверхкритические (сверхкритический флюид с температурой выше 375 °С) геотермальные резервуары [6, 25, 43]. Формирование сверхкритических гидротермальных резервуаров привело к резкому росту пластового давления, что инициировало процессы природного гидроразрыва по напластованию осадочных пород.



2. В начальной стадии водо- и парогазообмена рассолы ближайших к силлу пластов и горизонтов непосредственно над силлом «прокипели» с испарением воды как растворителя. Понятие свободной воды как растворителя природных солей рассмотрено в работах Е.В. Зелинской [45], С. Юань и др. [12]. Допускается [14, 38] неоднократное пульсирующее смешение глубинных пресных термальных вод с рудной (литий, рубидий, цезий, стронций, бор, свинец, тантал, ниобий, цирконий, иттрий, иттербий, европий [32]) минерализацией и первично-седиментогенных, метаморфизованных рассолов чехла.

3. Перегретые выше 400–600 °С сверхкритические пневматолитовые и парогазовые струи и кипящие рассолы «пришли» по циркуляции в пограничную область силла. Здесь сформировалась зона аномальных давлений и пульсационного [32] активного флюидообмена, в котором участвовали циркулирующие гетерофазные гидротермы и погребенные прогретые редкометалльные рассолы из приконтактных зон субвертикальных магматических даек и некков, трубок взрыва. Данные залежи промышленных металлоносных рассолов вскрываются глубокими скважинами в процессе поисков нефти и газа бурением (см. рис. 3).

4. Конденсация пара и агрессивность разбавленных горячих рассолов к карбонатам, в разной степени обогащенных глубинными магматическими флюидами, активизировала скорость протекания процессов глубинного карста, вероятно, сформировала разномаштабные флюидодинамические структуры. Такие структуры фиксируются как в бассейне над силлом, так и в области полосы вдоль апикальной границы силла и сопряженных тектонических структур (валы и дизъюнктивные зоны разуплотнения, разломы со смещением (см. рис. 5–7). Процесс глубинного соляного и карбонатного палеокарста в нарушенной эксплозией толще осадочного чехла активизировал формирование наложенных структурных форм в толще аллохтона.

Заключение

На примере юго-восточной части Сибирской платформы рассмотрена гипотеза магматогенно-гидротермального формирования флюидодинамических структур и преобразования редкометалльных промышленных рассолов в вулканогенно-осадочном бассейне под мощными толщами кембрийских

солей. Основа гипотезы – мощнейший этап платформенного магматизма в пермо-триасе [2–4, 37]. Проницаемые «флюидодинамические» палеоструктуры фиксируются по результатам детальных сейсморазведочных работ, в том числе объемной сейсморазведки в толще осадочного чехла. Они рассматриваются как каналы сосредоточенной палеоразгрузки флюидных пневматолитово-гидротермальных систем.

К сформированным флюидодинамическим структурам, наблюдаемым на временных разрезах, авторы относят:

- мульды проседания (компенсации) как в области субвертикальных «трубок взрыва» Ангара-Илимского типа [10], так и на некотором удалении от силла (см. рис. 5, 7);

- мульды проседания на восточных, сорванных по сместителям надвигов, аллохтонных крыльях линейных антиклиналей в толще раннего кембрия [32];

- инъективные залежи поликомпонентных металлоносных рассолов – «рапа-силлы», распределенные в межсолевых трещинных карбонатных резервуарах усольской свиты раннего кембрия, гипсометрически близких к осинскому горизонту [13, 14].

На этапе траппового магматизма по глубинным коровым разломам, по тектоническим структурам фронтальной части Байкало-Патомской надвиговой системы, по сформированным каналам межпластовых срывов шел прорыв парогазового фронта и внедрение базитовой расплава температурой около 1200 °С. Далее шел прогрев и наблюдалось кипение флюидных систем с частичным плавлением солей и эвакуацией пара через флюидодинамические структуры. Заключительный этап процесса включал длительную проработку, выщелачивание, карстование карбонатных трещинных резервуаров горячими гидротермами [7]. Процесс шел как через сквозные субвертикальные зоны разуплотнения – флюидодинамические структуры, так и по латерали в зоны авто-ГРП – ближайшие вверх от зоны магматического очага в осадочном чехле. Гидротермы также внедрялись во встречные по зонам межпластовых срывов области детачмента, формировались мульды проседания в межсолевых карбонатных трещинных породах-коллекторах кембрийского макрорезервуара.

Авторы полагают, что вулканические и поствулканические этапы воздействия маг-



матических и постмагматических пневматолитово-гидротермальных растворов на ближайшие к силлам участки осадочного чехла – это главные этапы формирования наблюдаемых флюидодинамических структур как субвертикальных «гидрогеологических окон» и субгоризонтальных замкнутых изометричных «рапа-силлов» [13, 14], которые видны на геолого-геофизических материалах современной объемной 3D-сейсморазведки (см. рис. 1, 3, 6). В подтверждение этой модели следует отнести также ряд карстовых воронок в карбонатной толще ордовика на территории исследований, сероводородное заражение углеводородных пластов, внезапные выбросы пачек неуглеводородных газов: угарного газа, углекислого газа, сероводорода. Эти явления наблюдались геологами во время бурения глубоких скважин 1 Правобережной, 133, 3 Жарковской, 134 Грузновской, 176 Рудовской, ряда колонковых поисковых скважин на калийные соли на Тутурской площади в Илгинской палеовпадине, на многих разведочных площадях Непского свода.

С момента внедрения магмы и к моменту окончания ее продвижения под и над осинским горизонтом, твердения и теплопередачи при остывании солеродный первично-осадочный артезианский бассейн был разделен силлом на два подбассейна – над- и подмагматический. Первый (верхний, надмагматический) – включает осадочные породы выше камеры магматического расплава, а позже – застывшего силла (см. рис. 2–4, 7). Второй (нижний, подмагматический) – объединяет толщу и природные резервуары рифея, терригенного и карбонатного венда и венда – кембрия. Развитие циркуляционных двухфазных (жидкость, пар) гидрогеологических систем в этом разделенном гигантским по площади магматическим телом бассейне шло по модели термолифта по субвертикальным проницаемым зонам из нижнего подбассейна в верхний. Пневматолитовые флюидные системы – мантийные разбавленные металлоносные сверхкритические газы и парогидротермы, перегретый пар, кипящие метаморфизованные крепкие и сверхкрепкие рассолы циркулировали через гидрогеологические окна вулканических трубок взрыва и даек (флюидодинамических структур), прорывающих чехол на участках «перескока» силла с нижних на более высокие уровни чехла, и через локальные каналы фильтрации (см. рис. 5, 7).

Формирование наблюдаемых флюидодинамических структур в осадочном чехле, явление глубинного солевого и карбонатного палеокарста, палеопроцессы формирования сложных каверново-трещинных межсолевых резервуаров и закономерности локализации инъективных залежей поликомпонентных металлоносных рассолов – «рапа-силлов» [14] в природных межсолевых трещинных карбонатных резервуарах нижнего кембрия трактуется авторами как суммарный итог двух уровней гидрогеологической эволюции:

- длительного по геологическим меркам равновесно-неравновесного преобразования рассолов по модели «вода – порода» [47–49];

- импульсной геохимической и геодинамической эволюции флюидных систем вулканогенно-осадочного чехла кратона на магматогенном и поствулканическом этапах в процессах локализованной разгрузки гидротерм [12–16, 33, 38].

Таким образом, флюидодинамические структуры сформированы при внедрении жидкой высокотемпературной (до 1100–1200 °C) трапповой магмы в галогенно-карбонатно-вулканогенную толщу чехла солеродного бассейна. Сегодня авторы рассматривают межсолевые карстово-трещинные природные резервуары раннего кембрия в области влияния гигантского Усольского силла на юге Сибирской платформы как реликты прорыва парогазового фронта вскипавших редкометалльных рассолов – «рапа-силлы», а также как транзитные пути длительной палеоразгрузки гидротермальных рудоносных флюидов. Естественные циркуляционные пневматолитово-гидротермальные системы в этапы платформенного магматизма коренным образом преобразовали гидрогеохимию природных редкометалльных поликомпонентных промышленных хлоридных рассолов Ангаро-Ленского артезианского бассейна, это важнейший [13, 14, 38] цикл металлогении «жидкой литиевой руды».

Таким образом, этапы платформенного магматизма Сибирского кратона и постмагматические процессы сыграли важнейшую рудоформирующую и рудолокализирующую роль в металлогении – минерации промышленных металлоносных рассолов, обусловили вторичное концентрирование богатейшей «жидкой» руды редких, рассеянных элементов и минеральных солей, в том числе брома, щелочных металлов – лития,



рубидия, цезия, калия, соединений со щелочноземельными кальцием и стронцием, формирование природных резервуаров с высокими фильтрационно-емкостными свой-

ствами, локализацию залежей рассолов и их последующую самоизоляция при снижении температур предельно насыщенных хлоридных систем.

Список источников

1. Геология Сибирской платформы / под ред. Н.И. Краснова, М.Л. Лурье, В.Л. Масайтиса. М.: Недра, 1966. 447 с.
2. Одинцов М.М., Домышев В.Г., Страхов Л.Г., Зуев П.П., Храмов А.Г., Шемес П.И. [и др.]. Ангаро-Вилуйский рудный пояс Сибирской платформы / отв. ред. Ф.А. Летников. Новосибирск: Наука, 1980. 113 с.
3. Страхов Л.Г. Рудоносные вулканические аппараты юга Сибирской платформы / отв. ред. М.М. Одинцов. Новосибирск: Наука, 1978. 117 с.
4. Феоктистов Г.Д. Петрология и условия формирования трапповых силлов / отв. ред. В.В. Золотухин. Новосибирск: Наука, 1978. 168 с.
5. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ivanov A.V., Mazukabzov A.M., Ukhova N.A., Ernst R., et al. Phanerozoic mafic magmatism in the southern Siberian craton: geodynamic implications // Russian Geology and Geophysics. 2010. Vol. 51. Iss. 9. P. 952–961. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.005>. EDN: MXIMNB.
6. Kiryukhin A.V., Solomatin A.V. Geomechanical conditions of seismic, volcanic, and hydrothermal activity in Kamchatka // Journal of Volcanology and Seismology. 2026. Vol. 20. Iss. 2. P. 67–80. <https://doi.org/10.1134/S0742046326700120>.
7. Никулин В.И., Фон-дер Флаас Г.С., Барышев А.С. Эксплозивно-вулканическая базальтоидная рудообразующая система (Ангарская железорудная провинция) // Геология рудных месторождений. 1991. № 3. С. 26–40.
8. Федотов С.А. Магматические и питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 454 с. EDN: QKFPCB.
9. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна: закономерности размещения, состав, динамика, формирование и использование. М.: Наука, 1966. 332 с.
10. Летников Ф.А., Медведев В.Я., Иванова Л.А. Взаимодействие гранитного расплава с карбонатами и силикатами: монография / отв. ред. Ю.В. Комаров. Новосибирск: Наука, 1978. 151 с.
11. Фон-дер Флаас Г.С. Магматический этап в эволюции рудообразующей системы ангаро-илимского типа // Геология и геофизика. 1992. Т. 33. № 2. С. 77–84. EDN: RFWPUS.
12. Yuan X., Hu Y., Zhao Y., Li Q., Liu C. Contribution of hydrothermal processes to the enrichment of lithium in brines: evidence from water – rock interacting experiments // Aquatic Geochemistry. 2021. Vol. 27. Iss. 3. P. 221–239. <https://doi.org/10.1007/s10498-021-09395-1>. EDN: MLYTNJ.
13. Вахромеев А.Г., Кирюхин А.В., Литвинова И.В., Данилова М.А., Сурмаажав Д. Вулканогенно-тектоническая модель формирования рудолокализирующих структур и обогащения межсоловых залежей промышленных литиеносных рассолов Ангаро-Ленского артезианского бассейна, Сибирская платформа // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы XXVII ежегод. науч. конф., посвящ. Дню вулканолога (г. Петропавловск-Камчатский, 27–29 марта 2024 г.). Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2024. С. 199–202. EDN: QIECPL.
14. Вахромеев А.Г., Кирюхин А.В., Сергеева А.В., Литвинова И.В. Моделирование условий формирования рапа-силлов и эксплуатации предельно насыщенных литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы // Подземная гидросфера: материалы Всерос. совещания по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием. (г. Екатеринбург, 21–28 июня 2024 г.). Екатеринбург: Изд-во ИГД УрО РАН, 2024. С. 14–19. EDN: RBCFCB.
15. Вожов В.И. Подземные воды и гидроминеральное сырье Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции: монография. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2006. 209 с.
16. Дзюба А.А. Разгрузка рассолов Сибирской платформы: монография / отв. ред. Е.В. Пиннекер. Новосибирск: Наука, 1984. 155 с.
17. Беленицкая Г.А. Об участии природных солей в щелочном магматизме. Статья 3. Генетические аспекты модели соляно-щелочных взаимодействий // Литосфера. 2021. Т. 21. № 2. С. 172–197. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-2-172-197>. EDN: WEWORJ.
18. Альмухамедов А.И., Медведев А.Я. К геохимии инициальных стадий базальтового вулканизма // Геохимия вулканитов различных геодинамических обстановок / ред. М.И. Кузьмин, Л.В. Таусон. Новосибирск: Наука, 1986. С. 49–69.
19. Альмухамедов А.И. Нестеренко Г.В. Геохимия дифференцированных траппов (Сибирская платформа): монография. М.: Наука, 1973. 298 с.
20. Нежданов А.А., Огибенин В.В., Смирнов А.С., Сподобаев А.А. Флюидодинамическая интерпретация сейсморазведочных данных МОВ ОГТ для поисков и разведки нефти и газа // Бурение и нефть. 2023. № 2. С. 12–19. EDN: ZZTOXZ.
21. Семинский Ж.В. О тектоническом районировании и металлогении Прибайкалья // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 4. С. 112–117. <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2017-40-4-112-117>. EDN: QIMSJB.



22. Барышев А.С., Егоров К.Н., Кошкарёв Д.А. Минерагенические зоны юга Сибирской платформы // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2009. № 1. С. 5–17. EDN: KJBSBZ.
23. Романюк Т.В., Ткачев А.В. Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых неоген-четвертичных бор-литийносных провинций: монография. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с. EDN: RRXLXX.
24. Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф. Гидрогеология вулканогенов. СПб.: Наука, 2010. 394 с. EDN: QAPAND.
25. Kiryukhin A.V, Chernykh E., Polyakov A., Solomatin A. Magma fracking beneath active volcanoes based on seismic data and hydrothermal activity observations // Geosciences. 2020. Vol. 10. Iss. 2. P. 52. <https://doi.org/10.3390/geosciences10020052>.
26. Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (стратиграфия, история развития): монография. Новосибирск: Изд-во СНИИГИМС, 2009. 177 с. EDN: QKIYRJ.
27. Татьянанина Н.В., Козионов А.Е., Смирнов А.С. Прослеживание трапповых тел в сейсмическом поле на разных стратиграфических уровнях в условиях карбонатно-галогенного разреза Ангара-Ковыктинской зоны нефтегазоаккумуляции // Геология нефти и газа. 2025. № 1. С. 37–45. <https://doi.org/10.47148/0016-7894-2025-1-37-45>. EDN: HMIWOX.
28. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Вахромеев А.Г. Черемных А.В., Бобров А.А., Когут Е.И. Разломы и сейсмичность юга Сибирской платформы: особенности проявления на разных масштабных уровнях // Литосфера. 2008. № 4. С. 3–21. EDN: JVJDJN.
29. Семинский К.Ж., Саньков В.А., Огибенин В.В., Бурзунова Ю.П., Мирошниченко А.И., Горбунова Е.А. [и др.]. Тектонофизический подход к анализу геолого-геофизических данных на газоконденсатных месторождениях со сложным строением платформенного чехла // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 587–627. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0364>. EDN: YAWRML.
30. Смирнов О.А., Бородин В.Н., Плавник А.Г., Лукашов А.В., Фарышова И.А., Васильев Ю.В. Характеристика траппового магматизма в пределах месторождений Ангара-Ленской нефтегазоносной области по данным бурения и сейсморазведки 3D // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2022. № 6. С. 5–10. [https://doi.org/10.33285/2413-5011-2022-6\(366\)-5-10](https://doi.org/10.33285/2413-5011-2022-6(366)-5-10). EDN: TKXXAS.
31. Александров А.А., Левит А.Н., Семакин Б.В. Локальные неоднородности соляных толщ в сейсморазведке / отв. ред. В.В. Корягин, В.М. Свищев. М.: Наука, 1989. 77 с.
32. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы (по данным глубокого бурения, испытания скважин и полевой геофизики): монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 247 с.
33. Ilin A.I., Kompaniets S.V., Vakhromeev A.G. Features of the forecast of geological conditions of drilling of deep wells according to electromagnetic sounding // Saint Petersburg 2012 – 5th Saint Petersburg International Conference & Exhibition 2012. Making the Most of the Earth's Resources (Saint Petersburg, 2–5 April 2012). Houten: European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. EDN: SLGGIZ.
34. Мигурский А.В. Флюидодинамика на Сибирской платформе во время пермо-триасового траппового магматизма // Дегазация Земли: геофлюиды, нефть и газ, парагенезы в системе горючих ископаемых: тезисы Междунар. конф. (г. Москва, 30–31 мая – 1 июня 2006 г.). М.: ГЕОС, 2006. С. 153–155.
35. Вахромеев А.Г., Горлов И.В., Мисюркеева Н.В., Сверкунов С.А., Ланкин Ю.К., Смирнов А.С. Гидрогеологические основы локального прогноза флюидонапорных систем с аномально высоким пластовым давлением в карбонатных природных резервуарах кембрия Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2018. № 4. С. 49–59. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2018-4-49-59>. EDN: VQSXOM.
36. Анциферов А.С. Ресурсы уникальных хлоридных кальциевых рассолов Сибирской платформы и проблемы их промышленного освоения // Разведка и охрана недр. 2004. № 8–9. С. 30–32.
37. Абрамович Г.Я., Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Плюмовые магматогенно-рудные системы юга Восточной Сибири // Геология и полезные ископаемые юга Восточной Сибири: сборник науч. трудов ВостСибНИИГТИМС. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. Вып. 3. С. 18–24. EDN: TKMFYJ.
38. Вахромеев А.Г. Зелинская Е.В., Литвинова И.В., Погребная Д.А. Модель вторичного концентрирования литийносных рассолов в кипящих флюидных системах магматогенно-осадочных бассейнов гидроминеральной провинции Сибирской платформы // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием. (г. Петропавловск-Камчатский, 4–10 сентября 2023 г.). Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2023. С. 15–20. EDN: ХОСХJE.
39. Сурнин А.И., Литвинова И.В., Иванова Н.А. Гидротермальный этап в формировании гидродинамической системы осадочного чехла Сибирской платформы // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием. (г. Петропавловск-Камчатский, 3–8 сентября 2020 г.). Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 151–154. EDN: WYXFKM.
40. Алексеев С.В., Вахромеев А.Г., Коцупало Н.П., Рябцев А.Д. Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация: монография / отв. ред. Е.В. Складаров. Иркутск: Изд-во ООО «Географ», 2014. 162 с.
41. Гажула С.В. Особенности траппового магматизма в связи с условиями нефтегазоносности Сибирской платформы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. Т. 3. № 1. С. 5. EDN: JUTGRD.
42. Тонких М.Е., Барышев А.С., Егоров К.Н., Кошкарёв Д.А. Структурная позиция траппов юга Сибирской плат-



формы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 12. С. 65–73. EDN: ONXUIL.

43. Rychagov S.N. Giant gas-rich hydrothermal systems and their role in the generation of vapor-dominated geothermal fields and ore mineralization // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2014. Vol. 8. Iss. 2. P. 69–92. <https://doi.org/10.1134/S0742046314020067>. EDN: SKUGSH.

44. Novikov D.A., Gordeeva A.O., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Zhitova L.M. The influence of trap magmatism on the geochemical composition of brines of petroliferous deposits in the western areas of the Kureika syncline (Siberian Platform) // *Russian Geology and Geophysics*. 2021. Vol. 62. Iss. 6. P. 701–719. <https://doi.org/10.2113/RGG20194079>. EDN: INPPAC.

45. Зелинская Е.В. Теоретические основы изучения и рационального использования подземных рассолов. Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2002. 98 с.

46. Сонненфельд П. Рассолы и эвапориты / пер. с англ. М.: Мир, 1988. 480 с.

47. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Вахромеев А.Г., Владимиров А.Г., Волкова Н.И. Литиевые подземные воды Иркутской области и Западной Якутии // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2012. Т. 20. № 1. С. 27–33. EDN: OWLSAT.

48. Шварцев С.Л., Пиннекер Е.В., Перельман А.И., Кононов В.И., Назаров А.Д., Рассказов Н.М. [и др.]. Основы гидрогеологии: монография. Гидрогеохимия. Новосибирск: Наука, 1982. 286 с. EDN: XSWXHL.

49. Шварцев С.Л. О формировании крепких и предельно насыщенных подземных рассолов // *Проблемы соленаккумуляции: сборник докладов / отв. ред. М.А. Жарков, А.Л. Яншин*. Новосибирск: Наука, 1977. Т. 1. С. 192–195.

References

1. Krasnov N.I., Lurie M.L., Masaitis V.L. *Geology of the Siberian Platform*. Moscow: Nedra; 1966, 447 p. (In Russ.).
2. Odintsov M.M., Domyshev V.G., Strakhov L.G., Zuev P.P., Khramov A.G., Shemes P.I., et al. *Angara-Vilyui ore belt of the Siberian platform*. Novosibirsk: Nauka; 1980, 113 p. (In Russ.).
3. Strakhov L.G. *Ore-bearing volcanic edifices of the south of the Siberian platform*. Novosibirsk: Nauka; 1978, 117 p. (In Russ.).
4. Feoktistov G.D. *Trap sill petrology and formation conditions*. Novosibirsk: Nauka; 1978, 168 p. (In Russ.).
5. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ivanov A.V., Mazukabzov A.M., Ukhova N.A., Ernst R., et al. Phanerozoic mafic magmatism in the southern Siberian craton: geodynamic implications. *Russian Geology and Geophysics*. 2010;51(9):952-961. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.005>. EDN: MXIMNB.
6. Kiryukhin A.V., Solomatin A.V. Geomechanical conditions of seismic, volcanic, and hydrothermal activity in Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2026;20(2):67-80. <https://doi.org/10.1134/S0742046326700120>.
7. Nikulin V.I., Fon-der Flaas G.S., Baryshev A.S. Explosive volcanic basaltoid ore-forming system (Angara iron ore province). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 1991;3:26-40. (In Russ.).
8. Fedotov S.A. *Magmatic feeding systems and mechanism of volcano eruptions*. Moscow: Nauka; 2006, 454 p. (In Russ.). EDN: QKFPCB.
9. Pinneker E.V. *Brines of the Angara Lena artesian basin: patterns of distribution, composition, dynamics, formation and use*. Moscow: Nauka; 1966, 332 p. (In Russ.).
10. Letnikov F.A., Medvedev V.Ya., Ivanova L.A. *Interaction of granite melt with carbonates and silicates: monograph*. Novosibirsk: Nauka; 1978, 151 p. (In Russ.).
11. Von-der Flaas G.S. Magmatic stage in evolution of the ore-forming system of the Angara-Ilim type. *Russian Geology and Geophysics*. 1992;33(2):77-84. (In Russ.). EDN: RFWPUS.
12. Yuan X., Hu Y., Zhao Y., Li Q., Liu C. Contribution of hydrothermal processes to the enrichment of lithium in brines: evidence from water – rock interacting experiments. *Aquatic Geochemistry*. 2021;27(3):221-239. <https://doi.org/10.1007/s10498-021-09395-1>. EDN: MLYTNJ.
13. Vakhromeev A.G., Kiryukhin A.V., Litvinova I.V., Danilova M.A., Surmaazhav D. Volcanogenic-tectonic model of the formation of ore-localizing structures and enrichment of deposits of industrial lithium-bearing brines of the halogen-carbonate hydrogeological formation of the Angara-Lena artesian basin, Siberian platform. In: *Volcanism and Related Processes: Proceedings of the 27th annual scientific conference dedicated to the Volcanologist Day*. 27–29 March 2024, Petropavlovsk-Kamchatsky. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences; 2024, p. 199-202. (In Russ.). EDN: QIECPL.
14. Vakhromeev A.G., Kiryukhin A.V., Sergeeva A.V., Litvinova I.V. Modeling formation conditions of brine sills and operation of maximally saturated lithium-bearing brines in the south of the Siberian platform. In: *Underground Hydrosphere: Proceedings of the All-Russian meeting on groundwater in the east of Russia (24th Meeting on groundwater in Siberia and the Far East with international participation)*. 21–28 June 2024, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2024, p. 14-19. (In Russ.). EDN: RBCFCB.
15. Vozhov V.I. *Groundwater and hydromineral raw materials of the Lena-Tunguska oil and gas province*. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials; 2006, 209 p. (In Russ.).
16. Dzyuba A.A. *Siberian platform brines discharge*. Novosibirsk: Nauka; 1984, 155 p. (In Russ.).
17. Belenitskaya G.A. On the participation of natural salts in alkaline magmatism. Article 3. Genetic aspects of the model of salt-alkaline interactions. *Lithosphere (Russia)*. 2021;21(2):172-197. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-2-172-197>. EDN: WEWORJ.
18. Al'mukhamedov A.I., Medvedev A.Ya. On the geochemistry of the initial stages of basaltic volcanism. In: Kuz'min M.I., Tauson L.V. (eds). *Geochemistry of volcanic rocks in various geodynamic settings*. Novosibirsk: Nauka; 1986, p. 49-69. (In Russ.).



19. Al'mukhamedov A.I. Nesterenko G.V. *Geochemistry of differentiated traps (Siberian Platform)*. Moscow: Nauka; 1973, 298 p. (In Russ.).
20. Nezhdanov A.A., Ogibenin V.V., Smirnov A.S., Spodobaev A.A. Fluid dynamic interpretation seismic survey data MRV CDP for oil and gas prospecting and exploration. *Burenie i neft'*. 2023;2:12-19. (In Russ.). EDN: ZZTOXZ.
21. Seminsky Zh.V. On Baikal region tectonic zoning and metallogeny. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*. 2017;40(4):112-117. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2017-40-4-112-117>. EDN: QIMSJB.
22. Baryshev A.S., Egorov K.N., Koshkarev D.A. Mineragenic zones of the south of Siberian platform. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2009;1:5-17. (In Russ.). EDN: KJBSBZ.
23. Romanyuk T.V., Tkachev A.V. *Geodynamic scenario of generation of the largest in the world boron-lithium provinces in the Miocene-quaternary*. Moscow: Svetoch Plyus; 2010, 304 p. (In Russian). EDN: RRXLXX.
24. Kiryukhin A.V., Kiryukhin V.A., Manukhin Yu.F. *Hydrogeology of volcanogenic rocks*. Saint Petersburg: Nauka; 2010, 394 p. (In Russ.). EDN: QAPAH.
25. Kiryukhin A.V., Chernykh E., Polyakov A., Solomatin A. Magma fracking beneath active volcanoes based on seismic data and hydrothermal activity observations. *Geosciences*. 2020;10(2):52. <https://doi.org/10.3390/geosciences10020052>
26. Mel'nikov N.V. *Vendian-Cambrian salt-bearing basin of the Siberian platform (stratigraphy, history of development): the monograph*. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials; 2009, 177 p. (In Russ.). EDN: QKIYRJ.
27. Tatyana N.V., Kozionov A.E., Smirnov A.S. Trap bodies tracing in seismic field at different stratigraphic levels in halogenic-carbonate section of Angaro-Kovyktinsky oil and gas accumulation zone. *Russian Oil and Gas Geology*. 2025;1:37-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.47148/0016-7894-2025-1-37-45>. EDN: HMIWOX.
28. Seminsky K.Zh., Gladkov A.S., Vakhromeev A.G., Cheremnykh A.V., Bobrov A.A., Kogut E.I. Faults and seismicity of the south of Siberian Platform: features of display at different scale levels. *Lithosphere (Russia)*. 2008;4:3-21. (In Russ.). EDN: JVJDJN.
29. Seminsky K.Zh., Sankov V.A., Ogibenin V.V., Burzunova Yu.P., Miroshnichenko A.I., Gorbunova E.A., et al. Tectonophysical approach to the analysis of geological and geophysical data on gas-condensate deposits with the complex platform cover. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(3):587-627. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0364>. EDN: YAWRML.
30. Smirnov O.A., Borodkin V.N., Plavnik A.G., Lukashov A.V., Faryshova I.A., Vasiliev Yu.V. Characteristics of trapping magmatism within the fields of the Angara-Lena oil and gas-bearing region according to drilling and 3D seismic exploration data. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2022;6:5-10. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/2413-5011-2022-6\(366\)-5-10](https://doi.org/10.33285/2413-5011-2022-6(366)-5-10). EDN: TKXXAS.
31. Aleksandrov A.A., Levit A.N., Semakin B.V. *Local heterogeneities of salt strata in seismic exploration*. Moscow: Nauka; 1989, 77 p. (In Russ.).
32. Vakhromeev A.G. *Patterns of industrial brine deposits formation and localization in Cambrian carbonated viggy-fractured rocks reservoir of south Siberian plate (based on deep drilling, well testing, and field geophysics data)*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015, 247 p. (In Russ.).
33. Ilin A.I., Kompaniets S.V., Vakhromeev A.G. Features of the forecast of geological conditions of drilling of deep wells according to electromagnetic sounding. In: *Saint Petersburg 2012 – 5th Saint Petersburg International Conference & Exhibition 2012. Making the Most of the Earth's Resources.*, 2–5 April 2012, Saint Petersburg. Houten: European Association of Geoscientists & Engineers; 2012. EDN: SLGGIZ.
34. Migurskii A.V. Fluid dynamics on the Siberian platform during Permo-Triassic trap magmatism. In: *Degassing of the Earth: Geofluids, Oil and Gas, Paragenesis in the Fossil Fuel System: abstracts of the International Conference*. 30–31 May – 1 June 2006, Moscow. Moscow: GEOS; 2006, p. 153-155. (In Russ.).
35. Vakhromeev A.G., Gorlov I.V., Misiurkeeva N.V., Sverkunov S.A., Lankin Yu.K., Smirnov A.S. Hydrogeological fundamentals of local forecast of fluid pressure systems with AHRP in carbonate natural Cambrian reservoirs of the Kovyktinskoye gas condensate field. *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2018;4:49-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2018-4-49-59>. EDN: VQXSOM.
36. Antsiferov A.S. Resources of unique calcium chloride brines of the Siberian Platform and problems of their industrial development. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2004;8-9:30-32. (In Russ.).
37. Abramovich G.Ya., Kuz'min M.I., Yarmolyuk V.V. Plume magmatogenic ore systems of the Southern Eastern Siberia. In: *Geology and minerals of the South of Eastern Siberia: collected scientific papers of the East Siberian Scientific Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2014, iss. 3, p. 18-24. (In Russ.). EDN: TKMFYJ.
38. Vakhromeev A.G., Zelinskaya E.V., Litvinova I.V., Pogrebnaya D.A. Model of secondary concentration of lithium-bearing brines in boiling fluid systems of magmatogenic-sedimentary basins of the hydromineral province of the Siberian Platform. In: *Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology: Proceedings of All-Russian scientific conference with international participation*. 4–10 September 2023, Petropavlovsk-Kamchatsky. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences; 2023, p. 15-20. (In Russ.). EDN: XOCXJE.



39. Surnin A.I., Litvinova I.V., Ivanova N.A. Hydrothermal stage in the formation of the hydrodynamic system of the sedimentary cover of the Siberian Platform. In: *Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology: Proceedings of All-Russian scientific conference with international participation*. 3–8 September 2020, Petropavlovsk-Kamchatsky. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020, p. 151-154. (In Russ.). EDN: WYXFKM.
40. Alekseev S.V., Vakhromeev A.G., Kotsupalo N.P., Ryabtsev A.D. *Industrial brines of the Siberian Platform: hydrogeology, drilling and production, processing, utilization*. Irkutsk: OOO "Geograf"; 2014, 162 p. (In Russ.).
41. Gazhula S.V. Peculiarities of a trap mechanism in connection with the petroleum potential conditions of the Siberian Platform. *Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2008;3(1):5. (In Russ.). EDN: JUTGRD.
42. Tonkikh M.E., Baryshev A.S., Egorov K.N., Koshkarev D.A. Structural position of traps in the south of Siberian Platform. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011;12:65-73. (In Russ.). EDN: ONXUIL.
43. Rychagov S.N. Giant gas-rich hydrothermal systems and their role in the generation of vapor-dominated geothermal fields and ore mineralization. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2014;8(2):69-92. <https://doi.org/10.1134/S0742046314020067>. EDN: SKUGSH.
44. Novikov D.A., Gordeeva A.O., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Zhitova L.M. The influence of trap magmatism on the geochemical composition of brines of petroliferous deposits in the western areas of the Kureika syncline (Siberian Platform). *Russian Geology and Geophysics*. 2021;62(6):701-719. <https://doi.org/10.2113/RGG20194079>. EDN: INPPAC.
45. Zelinskaya E.V. *Theoretical foundations of the study and rational use of underground brines*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2002, 98 p. (In Russ.).
46. Sonnenfeld P. *Brines and evaporates*. Orlando; 1984, 613 p. (Russ. ed.: *Rassoly i ehvapority*. Moscow: Mir; 1988, 480 p.).
47. Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Vakhromeev A.G., Vladimirov A.G., Volkova N.I. Lithium-bearing ground waters of the Irkutsk region and West Yakutia. *Chemistry for Sustainable Development*. 2012;20(1):27-33. (In Russ.). EDN: OWLSAT.
48. Shvartsev S.L., Pinneker E.V., Perel'man A.I., Kononov V.I., Nazarov A.D., Rasskazov N.M., et al. *Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeochemistry*. Novosibirsk: Nauka; 1982, 286 p. (In Russ.). EDN: XSWXHL.
49. Shvartsev S.L. On the formation of strong and extremely saturated underground brines. In: Zharkov M.A., Yanshin A.L. (eds). *Problems of salt accumulation*. Novosibirsk: Nauka; 1977, vol. 1, p. 192-195. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Вахромеев Андрей Гелиевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
эксперт отдела гидроминерального сырья,
Филиал ООО «РН-ГИР» в городе Москве –
Центр технических компетенций Института геологии
и разработки горючих ископаемых,
г. Красноярск, Российская Федерация,
заведующий лабораторией геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Российская Федерация,
профессор кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
✉ andrey_igp@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0712-6568>

Andrey G. Vakhromeev,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Expert of the Department of Hydromineral Raw Materials,
Branch of RN-Geology Research Development LLC in Moscow –
Technical Competence Centre of the Institute of Geology and Fossil Fuel Development,
Krasnoyarsk, Russian Federation,
Head of the Oil and Gas Geology Laboratory,
Institute of the Earth's Crust,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation,
Professor of the Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
✉ andrey_igp@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0712-6568>



Данилова Мария Александровна,

кандидат геолого-минералогических наук,
начальник отдела гидроминерального сырья,
Филиал ООО «РН-ГИР» в городе Москве –
Центр технических компетенций Института геологии
и разработки горючих ископаемых,
г. Красноярск, Российская Федерация,
научный сотрудник лаборатории гидрогеологии,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
Danilovama@rn-gir.rosneft.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1371-4216>

Maria A. Danilova,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Department of Hydromineral Raw Materials,
Branch of RN-Geology Research Development LLC in Moscow –
Technical Competence Centre of the Institute of Geology and Fossil Fuel Development,
Krasnoyarsk, Russian Federation,
Researcher at the Hydrogeology Laboratory,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
Danilovama@rn-gir.rosneft.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1371-4216>



Мисюркеева Наталья Викторовна,

кандидат геолого-минералогических наук,
младший научный сотрудник лаборатории геологии нефти,
газа и гидроминерального сырья,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Российская Федерация,
начальник геологического отдела,
ООО «СИГМА-ГЕО»,
г. Иркутск, Российская Федерация,
Natasha-misur@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9953-4963>

Natalia V. Misyurkeeva,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Junior Researcher at the Laboratory of Oil,
Gas and Hydromineral Raw Materials Geology,
Institute of the Earth Crust,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation,
Head of the Geological Department,
SIGMA-GEO LLC,
Irkutsk, Russian Federation,
Natasha-misur@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9953-4963>



Сергеева Анастасия Валерьевна,

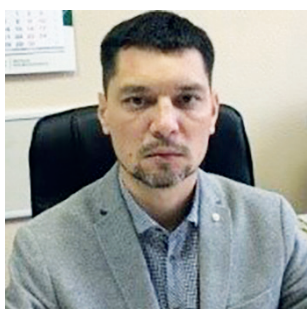
кандидат химических наук,
старший научный сотрудник аналитического центра,
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация,
anastavalers@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5127-347X>

Anastasia V. Sergeeva,

Cand. Sci. (Chemistry),
Senior Researcher, Analytical Center,
Institute of Volcanology and Seismology,
Far East Branch of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation,
anastavalers@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5127-347X>



Кирюхин Алексей Владимирович,
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник лаборатории тепломассопереноса,
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация,
AVKiryukhin2@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5468-1452>
Aleksey V. Kiryukhin,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Chief Researcher at the Laboratory of Heat and Mass Transfer,
Institute of Volcanology and Seismology,
Far East Branch of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation,
AVKiryukhin2@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5468-1452>



Мамаков Денис Олегович,
директор,
ООО «Сибгаз»,
г. Иркутск, Российская Федерация,
MamakovDO@rusgeology.ru
<https://orcid.org/0009-0007-3755-6351>
Denis O. Mamakov,
Director,
Sibgaz LLC,
Irkutsk, Russian Federation,
MamakovDO@rusgeology.ru
<https://orcid.org/0009-0007-3755-6351>



Погребная Дарья Александровна,
руководитель международных проектов,
ООО «Энерджи Крафт»,
г. Москва, Российская Федерация,
dapogrebnaya@energy-craft.com
<https://orcid.org/0009-0008-6658-8923>
Daria A. Pogrebnaia,
International Project Manager,
Energy Craft LLC,
Moscow, Russian Federation,
dapogrebnaya@energy-craft.com
<https://orcid.org/0009-0008-6658-8923>



Левин Алексей Владимирович,
главный менеджер отдела гидроминерального сырья,
Филиал ООО «РН-ГИР» в городе Москве –
Центр технических компетенций Института геологии
и разработки горючих ископаемых,
г. Красноярск, Российская Федерация,
LevinAV@rn-gir.rosneft.ru
<https://orcid.org/0009-0008-5492-060X>
Aleksey V. Levin,
Chief Manager of the Department of Hydromineral Raw Materials,
Branch of RN-Geology Research Development LLC in Moscow –
Technical Competence Centre of the Institute of Geology and Fossil Fuel Development,
Krasnoyarsk, Russian Federation,
LevinAV@rn-gir.rosneft.ru
<https://orcid.org/0009-0008-5492-060X>



Ощепкова Анастасия Владимировна,
кандидат геолого-минералогических наук,
главный специалист отдела гидроминерального сырья,
Филиал ООО «РН-ГИР» в городе Москве –
Центр технических компетенций Института геологии
и разработки горючих ископаемых,
г. Красноярск, Российская Федерация,
OshchepkovaAV@rn-gir.rosneft.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1702-3236>
Anastasia V. Oshchepkova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Chief Specialist of the Department of Hydromineral Raw Materials,
Branch of RN-Geology Research Development LLC in Moscow –
Technical Competence Centre of the Institute of Geology and Fossil Fuel Development,
Krasnoyarsk, Russian Federation,
OshchepkovaAV@rn-gir.rosneft.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1702-3236>



Квачко Светлана Константиновна,
эксперт управления геологии,
Филиал ООО «РН-ГИР» в городе Красноярске,
г. Красноярск, Российская Федерация,
KvachkoSK@rn-gir.rosneft.ru
<https://orcid.org/0009-0009-0577-6733>
Svetlana K. Kvachko,
Expert at the Geology Department,
Branch of RN-Geology Research Development LLC in Krasnoyarsk,
Krasnoyarsk, Russian Federation,
KvachkoSK@rn-gir.rosneft.ru
<https://orcid.org/0009-0009-0577-6733>



Корзун Анна Вадимовна,
кандидат геолого-минералогических наук,
эксперт отдела гидроминерального сырья,
Филиал ООО «РН-ГИР» в городе Москве –
Центр технических компетенций Института геологии
и разработки горючих ископаемых,
г. Красноярск, Российская Федерация,
доцент кафедры гидрогеологии,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация,
a.korzun@oilmsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1702-3236>
Anna V. Korzun,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Expert at the Department of Hydromineral Raw Materials,
Branch of RN-Geology Research Development LLC in Moscow –
Technical Competence Centre of the Institute of Geology and Fossil Fuel Development,
Krasnoyarsk, Russian Federation,
Associate Professor of the Department of Hydrogeology,
Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russian Federation,
a.korzun@oilmsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1702-3236>

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.Г. Вахромеев – разработка концепции, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.
М.А. Данилова – разработка концепции, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.
Н.В. Мисюркеева – разработка концепции, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.
А.В. Сергеева – разработка концепции, написание черновика рукописи.
А.В. Кирюхин – разработка концепции, редактирование рукописи.
Д.О. Мамаков – курирование данных, визуализация, написание черновика рукописи.



Д.А. Погребная – визуализация, написание черновика рукописи.
А.В. Левин – разработка концепции, визуализация, написание черновика рукописи.
А.В. Ощепкова – визуализация, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.
С.К. Квачко - курирование данных, визуализация, редактирование рукописи.
А.В. Корзун – написание черновика рукописи, редактирование рукописи.
Andrey G. Vakhromeev – conceptualization, writing – original draft, writing – editing.
Maria A. Danilova – conceptualization, writing – original draft, writing – editing.
Natalia V. Misyurkeeva – conceptualization, writing – original draft, writing – editing.
Anastasia V. Sergeeva – conceptualization, writing – original draft.
Aleksey V. Kiryukhin – conceptualization, writing – editing.
Denis O. Mamakov – data curation, visualisation, writing – original draft.
Daria A. Pogrebnaia – visualisation, writing – original draft.
Aleksey V. Levin – conceptualization, visualisation, writing – original draft.
Anastasia V. Oshchepkova – visualisation, writing – original draft, writing – editing.
Svetlana K. Kvachko – data curation, visualisation, writing – editing.
Anna V. Korzun – writing – original draft, writing – editing.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 27.04.2026; одобрена после рецензирования 19.05.2026; принята к публикации 25.05.2026.

The article was submitted 27.04.2026; approved after reviewing 19.05.2026; accepted for publication 28.05.2026.