НАУКА ЮГА РОССИИ 2023 Т. 19 № 4 С. 42–51
SCIENCE IN THE SOUTH OF RUSSIA 2023 VOL. 19 No 4 P. 42–51

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 553.041
DOI: 10.7868/S25000640230404

ПЕРСПЕКТИВЫ АРАЛЬСКОГО РЕГИОНА (РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН) НА ЛИТИЕВОЕ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ

© 2023 г. С.Г. Парада[1], М.Ю. Маркин[2], К.Ю. Гамбург[1]

Аннотация. Статья посвящена оценке аральского региона Республики Казахстан на наличие литиевого гидроминерального сырья (ЛГМС) на основе критериев и признаков, установленных путем анализа литературных данных по регионам с крупными ресурсами ЛГМС. Аральский регион представляет собой тектоническую депрессию, занимаемую в различное время водами Аральского моря. Впервые обращено внимание на проявление гигантской тепловой аномалии, захватывающей всю депрессию, как отражение восходящих эндогенных потоков энергии и вещества. Эти потоки могли привносить в бассейн седиментации литий и другие ценные элементы, которые при испарении накапливались в галогенных отложениях. В отношении ЛГМС интерес представляют верхнеплиоценовые и голоценовые слои. В первых до глубины 500 м отмечаются перспективные на ЛГМС толщи соли суммарной мощностью 85 м. Для голоценовой стадии развития Аральского моря характерны резкие колебания его уровня и солености. В регрессивные эпохи, совпадавшие с жаркими аридными условиями и, скорее всего, с активизацией теплового потока, уровень Арала резко падал. Море мелело и разбивалось на отдельные заполненные высокоминерализованными водами озера. Состав регрессивных осадков преимущественно песчано-алевритовый и хемогенный (гипс, мирабилит и др.). В Малом Аральском море накапливались хемогенные отложения, а на побережьях существовали солончаковые ландшафты. Приведены расчеты возможных концентраций растворенных форм лития в морской воде (порядка 15 мг/л) по состоянию на 1967 г. (до начала современного обмеления Арала). С тех пор уровень моря понизился более чем на 16 м. При этом на обнажившемся дне моря скопились миллиарды тонн солей различных металлов, включая литий. Все эти соли, проникая в поровые и грунтовые воды, могли обогащать их, образуя в районе дна бывшего моря рапу, содержащую высокие концентрации солей редких металлов, в том числе лития.

Ключевые слова: прогноз полезных ископаемых, литиевое гидроминеральное сырье, соли, рапа, минерализованные воды, аридный климат, тепловая аномалия, Аральское море.

PROSPECTS OF THE ARAL REGION (REPUBLIC OF KAZAKHSTAN) FOR THE DETECTION OF LITHIUM HYDROMINERAL RAW MATERIALS

S.G. Parada[1], M.Yu. Markin[2], K.Yu. Gamburg[1]

Abstract. The article is devoted to the assessment of the Aral region of the Republic of Kazakhstan for the presence of lithium hydromineral raw materials (LHMRM) on the basis of criteria and features established by analyzing literature data on regions with large LHMRM resources. The Aral region is a tectonic depression occupied at various times by the waters of the Aral Sea. For the first time, attention is drawn to the manifestation of a giant thermal anomaly that captures the entire depression, as a reflection

[1] Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: maurmar@yandex.ru

[2] Товарищество с ограниченной ответственностью «ГеоСтройСистема» (“GeoStroySistema” Limited Liability Partnership, Almaty, Republic of Kazakhstan), Республика Казахстан, 050000, г. Алматы, Алатауский район, микрорайон Саялы, 41/1, e-mail: markin_maxim@inbox.ru

of ascending endogenous flows of energy and matter. These flows could bring lithium and other valuable elements into the sedimentation pool, which accumulated in halogen deposits during evaporation. It is shown that the Upper Pliocene and Holocene layers are of interest in relation to LHMRM. In the first, up to a depth of 500 m, promising salt strata with a total capacity of 85 m are noted on LHMRM. The Holocene stage of development of the Aral Sea is characterized by sharp fluctuations in its level and salinity. In regressive epochs, coinciding with hot arid conditions and, most likely, with the activation of heat flow, the level of the Aral Sea fell sharply. The sea was shallow and broke into separate lakes filled with highly mineralized waters. The composition of regressive sediments is mainly sandy-siltstone chemogenic (gypsum, mirabilite, etc.). Chemogenic deposits accumulated in the Small Sea, and saline landscapes existed on the coasts. Calculations of possible concentrations of dissolved forms of lithium in seawater of the order of 15 mg/l as of 1967 (before the beginning of modern shallowing of the Aral Sea) are given. The sea level has dropped by more than 16 m since then. At the same time, millions of tons of salts of various metals, including lithium, accumulated on the exposed bottom of the sea. All these salts, penetrating into the pore and groundwater, could enrich them, forming a brine containing high concentrations of salts of rare metals, including lithium, in the area of the bottom of the former sea.

Keywords: forecast of minerals, lithium hydromineral raw materials, salts, brine, mineralized waters, arid climate, thermal anomaly, Aral Sea.

ВВЕДЕНИЕ

Литий – элемент XXI века. Благодаря своим уникальным свойствам литий играет важную роль в индустриальном развитии современного общества. Области его практического использования, неразрывно связанные с применением высоких технологий, весьма разнообразны. Они включают производство первичных и вторичных аккумуляторных батарей, химических компонентов для ядерных энергетических реакторов, специальных масел и смазок, стекла, керамики и синтетических волокон, первичного алюминия, металлургию легких сплавов, производство хладагентов и систем осушки воздуха, дезинфицирующих средств и др.

Спрос на литий растет и продолжит расти по мере того, как транспортные средства будут становиться более «зелеными», а электричество – экологичным. Так, цены на карбонат лития стремительно выросли с 13000 долларов за тонну в июле 2021 г. до 75000 в апреле 2022 г. и до 83000 в январе 2023 г. на фоне роста мирового спроса и сокращения поставок. По данным Benchmark Mineral Intelligence [1], запасы карбоната лития у производителей аккумуляторов находятся на низком или нулевом уровне из-за высокого спроса на производство аккумуляторов для электромобилей, что вызывает ажиотаж и дефицит, при этом текущие темпы добычи недостаточны. По оценке GlobalData [2], к 2024 г. спрос увеличится в 2,5 раза, а прогноз Международного энергетического агентства [2] говорит о том, что к 2040 г. востребованность лития вырастет в 40 раз. Экстренная необходимость в развитии литиевой промышленности вылилась в так называемую скоростную добычу. Крупнейшие добывающие компании развернули масштабную деятельность по поиску новых месторождений, а также по разработке технологий извлечения лития.

По данным Геологической службы США на 2021 г. [3], выявленные ресурсы лития во всем мире значительно выросли и составляют около 86 млн т. Боливия обладает самыми большими запасами в мире – 21 млн т, за ней следуют Аргентина (19,3 млн т), Чили (9,6 млн т), Австралия (6,4 млн т), Китай (5,1 млн т), Демократическая Республика Конго (3 млн т), Канада (2,9 млн т) и Германия (2,7 млн т). Однако очевидно, что это лишь малая часть мировых запасов. Россия по запасам лития занимает третье место в мире, основные запасы связаны с твердыми рудами в 17 месторождениях, но они не разрабатываются.

Месторождения лития также обнаружены в Австрии, Сербии, Финляндии, Мали. В Европе большие надежды возлагают на крупнейшие литиевые запасы Португалии. Еще есть месторождения, расположенные в Кировоградской, Днепропетровской и Житомирской областях Украины, а также в Донецкой Народной Республике.

Таким образом, в настоящее время литий характеризуется одним из самых быстрых темпов роста цены, потребления и объемов добычи, что стимулировало расширение геологической разведки и привело к резкому увеличению разведанных запасов.

Вместе с тем, по данным Израильского исследовательского центра [4], в соответствии с существующими технологиями и скоростью роста про-

изводства лития твердые литиевые руды закончатся примерно через 25 лет, а разведанные запасы, связанные с соляными озерами, истощатся примерно через 50 лет. В связи с этим в качестве одного из направлений увеличения ресурсной базы лития предлагается использование бедных литием подземных вод и рассолов пересыхающих озер, которые принято называть литиевым гидроминеральным сырьем (ЛГМС) [5].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В настоящем исследовании использованы материалы, приведенные в опубликованной литературе и в телекоммуникационной сети Internet. Метод исследования – обобщение данных по крупным месторождениям ЛГМС и сопоставление их с результатами исследований аральского региона.

Анализ физико-географических условий расположения литиеносных соляных озер Южной и Северной Америки, Центральной Азии и других регионов показывает их распространенность в условиях аридного климата и преимущественно в высокогорьях, что в совокупности обеспечивает интенсивное испарение и концентрацию солей в осадке. Из геологических условий наибольшее внимание обращает на себя наличие признаков вулканической и гидротермальной деятельности во времена появления и существования этих озер в плейстоцене и голоцене и сопровождающих такую деятельность тепловых потоков [6]. Литий является эндогенным элементом, в качестве источника которого выступают глубинные флюиды. Это позволяет предположить, что литий поступает в соляные озера с восходящими потоками пневматолитово-гидротермальных растворов.

Таким образом, в качестве одного из факторов формирования химического состава рассолов и соляных отложений принимаются эндогенные процессы, представленные магматической и пневматолитово-гидротермальной деятельностью, а процессам испарения отводится функция вторичного обогащения.

В Республике Казахстан достаточно широко распространены эндогенные литиевые руды. Основные из них связаны с пегматитовыми месторождениями Восточно-Казахстанской области (Белогорское, Бакенное, Верхне-Баймурзинское, Юбилейное, Таргынское, Ахметкино). Литиевая минерализация установлена также в альбititовых месторождениях и рудопроявлениях Верхнее Эспе, Карасу, Азутау, а также в кварцево-жильном месторождении Кокколь. Руды всех этих объектов содержат и другие редкие и редкоземельные металлы (рубидий, цезий и др.).

Эндогенная литиевая минерализация установлена и в других районах Республики Казахстан. Так, в Верхне-Иргизском месторождении в Актюбинской области литий обнаружен в пегматитовых жилах; в месторождениях Смирновское и Дрожжиловское – в кварцевых жилах, штокверках, зонах грейзенизации (Костанайская область); в месторождении Жанет (Карагандинская область) литий наден в кварцево-жильном штокверке и в пегматитах; в Алматинской области выделяется скарново-грейзеновое месторождение Карагайлыактас с попутным оруденением лития; в Жамбылской области литиевое оруденение установлено в кварцево-жильном месторождении Майколь. Присутствие литиевой минерализации обнаруживает себя и в урановых месторождениях на территории бассейна р. Чу.

Все перечисленные объекты могут служить источником лития за счет выщелачивания восходящими пневматолитовыми и гидротермальными растворами, которые в дальнейшем разгружаются в водных объектах. Испарение поверхностных вод в условиях аридного климата служит дополнительным фактором концентрации лития и других ценных элементов.

Таким образом, литий в повышенных концентрациях может быть обнаружен в Республике Казахстан в наземных и подземных минерализованных водах, в засоленных глинистых породах такыров, в рапе солончаков и в высохших или высыхающих озерах Прикаспийской низменности, на территории бассейна р. Чу, Аральского моря и в других районах. Вероятность обнаружения промышленных концентраций лития в пределах площадей вышеупомянутых природных сред и районов Республики Казахстан весьма высокая. Наиболее перспективным в этом отношении является пересохшее дно Аральского моря.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С давних времен Аральское море являлось объектом многочисленных научных исследований. Однако в качестве источника полезных ископаемых оно не рассматривалось. За последние более чем 40 лет уровень Аральского моря понизился на 16 м. При обмелении на обнажившемся дне моря скопилось огромное количество солей различных ме-

таллов, в составе которых возможно обнаружение лития. Проникая в поровые воды и воды зоны аэрации, эти соли могли обогащать их различными химическими элементами, образуя рапу, содержащую высокие концентрации солей редких металлов.

Наличие крупной тепловой положительной аномалии под Аральским морем [7] с градиентом от 35 до 45 °С/км (рис. 1) свидетельствует о глубинном источнике тепловой энергии. С восходящими потоками энергии и вещества могли поступать литий и другие ценные элементы, обогащая воды Аральского моря.

Сведения о строении и составе соленосных отложений и рапы аральского региона и содержании лития в них отсутствуют. Имеющиеся данные начала 70-х гг. прошлого столетия о распределении лития в осадках Аральского моря [8] показывают, что максимальные концентрации лития содержали глинистые илы северных заливов и Малого Аральского моря, а также глинисто-известковистые осадки западной и центральной частей водоема (рис. 2). Приуроченность лития к глинистым осадкам продемонстрирована в таблице 1. В работе [9] показано, что области с максимальными концентрациями лития в осадках и области с максимальными содержаниями пелитовой фракции в осадках пространственно совпадают.

Согласно данным опробования 1967 г. [10] речная взвесь р. Амударьи содержала лития 40 г/т, в то время как донные осадки Аральского моря – 46,5 г/т. Это связано, скорее всего, с наличием в осадке растворимых форм лития, адсорбированного в дальнейшем пелитовыми частицами. После прекращения стока Амударьи содержание лития в донных осадках Аральского моря уменьшилось до 31,5 г/т, что, возможно, связано с прекращением поступления лития в составе твердых частиц и одновременной инфильтрацией его растворимых форм в подземные воды. Если такая модель верна, то содержание растворенных форм лития в водах Аральского моря находилось на уровне 46,5 − 31,5 = 15 мг/л, что выше минимальных промышленных содержаний (10 мг/л). В данном случае можно говорить о прямом признаке литиеносности вод Арала.

В связи с понижением уровня воды Аральское море сейчас разделено на две части. Большое Аральское море располагается в основном на территории Казахстана и питается водой р. Сырдарьи, других поступлений воды эта часть моря не имеет.

В геологическом отношении территория представляет собой Аральскую тектоническую

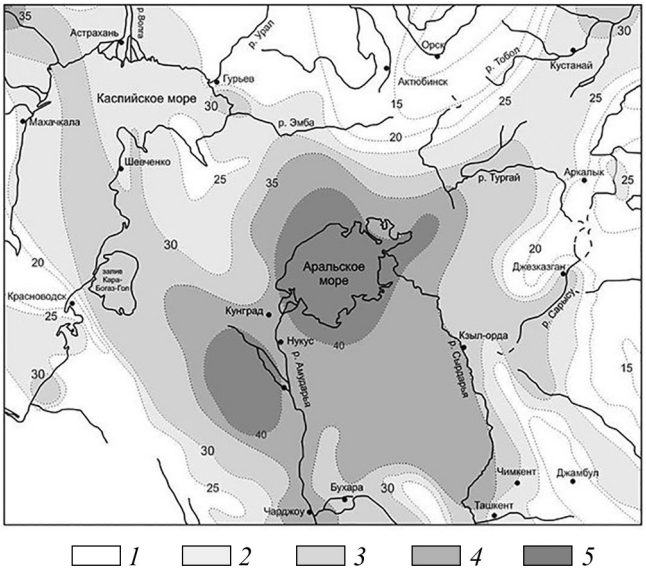

Рис. 1. Гигантская тепловая аномалия в районе Аральского моря по состоянию на 1977 г., фрагмент карты [7]. *1–5* – значения геотермического градиента (°С/км) в верхней части земной коры в пределах слабо литифицированных отложений осадочного чехла: *1* – <25, *2* – 25–30, *3* – 30–35, *4* – 35–40, *5* – >40.

Fig. 1. A giant thermal anomaly in the Aral Sea region as of 1977, map fragment [7]. *1–5* – values of the geothermal gradient (°C/km) in the upper part of the earth's crust within weakly lithified sedimentary cover deposits: *1* – <25, *2* – 25–30, *3* – 30–35, *4* – 35–40, *5* – >40.

депрессию, занимаемую в различное время водами Аральского моря. Она находится в зоне сочленения меридиональных структур Урала и широтных структур Тянь-Шаня. На западе она ограничена докембрийским кристаллическим выступом фундамента, а на северо-востоке – каледонидами Центрального Казахстана. Осадочный чехол депрессии имеет ярусное строение, по составу представлен преимущественно карбонатно-терригенными породами мезозоя и кайнозоя мощностью 3–4 км, дислоцированными в пологие складки, разделенные разрывными нарушениями. В морфологии дна Аральского моря отмечаются три поднятые структуры: Арало-Кызылкумский вал (вал Архангельского), Центрально-Аральское и Восточно-Аральское поднятия.

В отношении лития интерес представляют верхнеплиоценовые (акчагыльские и апшеронские) и четвертичные (преимущественно голоценовые) слои, сложенные осадками морских водоемов, заполнявших непосредственно Аральскую депрессию.

В основании акчагыла залегают мергели, глины, алевриты, кварцевые пески и песчаники кушканатауской свиты, перекрытые песчаника-

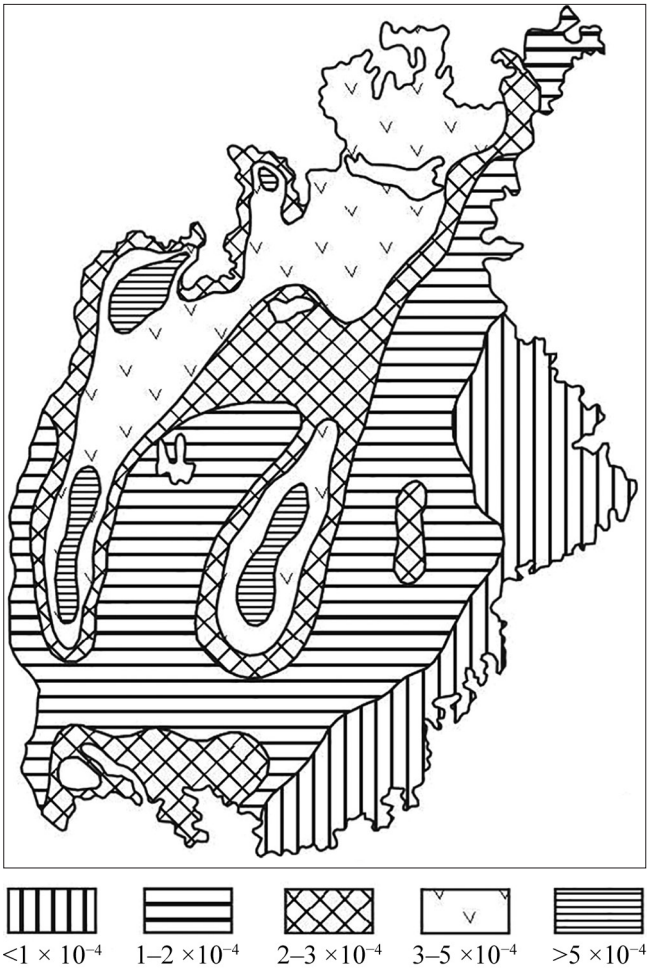

Рис. 2. Распределение лития (%) в осадках Аральского моря по состоянию на 1972 г. (по [8]).
Fig. 2. Distribution of lithium (%) in the Aral Sea sediments as of 1972 according to [8].

ми и глинисто-алевритовыми породами денчизкульской свиты [11]. В отложениях акчагыла на глубинах до 500 м отмечаются две перспективные на ЛГМС толщи соли суммарной мощностью 85 м, состоящие из мирабилита, галита, астраханита, глауберита и эпсомита, образовавшихся в регрессивную стадию водоема. Они свидетельствуют о резком сокращении в это время площади акчагыльского бассейна и увеличении солености вод до 100–150 г/л, что привело к выпадению мирабилита, дальнейшему увеличению солености до 230–250 г/л, выпадению галита, затем астраханита и, наконец, эпсомита [12]. Процесс акчагыльского хемогенного осадконакопления в целом был непродолжительным и на длительное время прерывался терригенным. В это время на большей части существовавшего в то время водоема происходило накопление глинистых и алевритовых осадков, сменявшихся по периферии водоема песчаными.

Апшеронские отложения в основании представлены серыми и серо-желтыми песками и песчаниками садыварской свиты [13]. Большая часть апшерона состоит из алеврито-пелитовых осадков. В районах Малого Аральского моря и о. Лазарева установлены детритусовые известняки, а в Сарыкамышской впадине – известковые конгломераты. Соленосные отложения и соли в апшероне не обнаружены.

На Арале в настоящее время отсутствуют достоверно датированные нижне- и среднеплейстоценовые отложения. Предполагается, что в это время в пределах Арало-Сарыкамышских депрессий, вдоль чинков Устюрта и современной дельты Амударьи, накапливались озерные пестроцветные глины и алевриты [14].

Верхнеплейстоценовые (конец позднего плейстоцена) и голоценовые отложения широко распространены в пределах Аральской депрессии. Они вскрыты скважинами и обнажаются в разрезах побережий. Среди верхнеплейстоцен-голоценовых отложений Аральского моря выделяются две толщи [15]. Нижняя толща условно относится к континентальным образованиям конца позднего плейстоцена. В основании она сложена шоколадными глинами, перекрытыми песками; вскрытая мощность отложений более 1,5 м. Верхняя – собственно голоценовая – толща в нижней части состоит из разнообразных наземноводных осадков белесого или белого цвета, чередующихся с прослоями глинистых и алевритовых илов, разнозернистых песков, ракуши и гипса суммарной мощностью 1,5 м. По присутствию разнообразной солоноватоводной и пресноводной малакофауны отложения отнесены к озерно-солончаковой стадии Арала. Верхняя часть голоценовой толщи представлена разнообразными по литолого-фациальному составу морскими осадками мощностью до 5 м и более. Для отложений характерно чередование различных по литолого-фациальным особенностям осадков, относимых к трансгрессивному и регрессивному состояниям Арала.

Литологические особенности морских голоценовых отложений отражают колебания уровня моря, изменение солености и состава его вод. Слойки, отвечающие высокому уровню водоема, характеризуются выдержанным илистым и алеврито-глинистым составом осадков с отно-

Таблица 1. Распределение средних содержаний элементов в осадках Аральского моря на бескарбонатное вещество (Zr, P, Mn, Ti, Fe и $C_{орг.}$ – %, остальные $\times 10^{-4}$ %) по состоянию на 1972 г. [9]
Table 1. Distribution of average element contents in the Aral Sea sediments for carbonate free substance (Zr, P, Mn, Ti, Fe and $C_{org.}$ – %, the rest $\times 10^{-4}$%) as of 1972 [9]

Элементы Elements	Пески / Sands		Алевриты Siltstones	Илы / Silts		
	мелкозернистые finegrained	оолитовые oolitic		алевритовые siltstone	глинистые clay	известковые calcareous
Zr	0,059	0,038	0,035	0,033	0,031	0,023
Ge	13	11	11	11	10	10
P	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,08
Mn	0,08	0,1	0,11	0,13	0,07	0,18
Pb	8	7	12	13	15	16
Ti	0,17	0,3	0,32	0,33	0,47	0,37
Cs	6	6	7	8	8	9
Rb	37	48	57	73	82	82
Cr	34	53	67	72	98	89
Co	6	9	9	10	14	15
Fe	1,38	2,36	3,11	3,33	3,9	3,72
Ni	8	19	24	30	33	32
Zn	41	78	84	94	114	131
Cu	7	13	15	18	20	25
Mo	1,1	3,7	1,4	2,7	4,2	4,9
Li	9	10	16	25	40	36
V	26	50	73	87	167	117
$C_{орг.}$ / $C_{org.}$	0,12	1	0,45	0,67	1,28	1,91

сительно редкими раковинами солоноватоводных и пресноводных моллюсков. Регрессивные слои осадков более разнообразны по составу и структуре: они более грубые, обычно песчаные, с прослоями и линзами ракуши солоноватоводных либо пресноводных моллюсков, часто обогащенные растительными остатками, иногда оторфованные, с прослоями гипса и хемогенного карбоната.

Таким образом, можно заключить: во время первого (позднеплиоценового) морского обводнения в пределах Аральской котловины длительное время (>3 млн лет) существовал морской водоем с резко изменчивыми солевым и гидродинамическим режимами, обусловленными общей динамикой акчагыльского и апшеронского бассейнов, непостоянством впадающих в Аральский залив речных водотоков и колебаниями климата. Несомненно, определенная роль принадлежала и тектоно-магматическим движениям, предопределившим, с одной стороны, само появление впадины и проникновение в нее вод позднеплиоценовых морей, с другой стороны, судя по тепловой аномалии, – подток эндогенных, возможно, обогащенных литием пневматолитово-гидротермальных растворов. Поэтому выявленные в акчагыльских отложениях две толщи солей могут быть обогащены литием и другими редкими и редкоземельными элементами.

Голоценовая история Аральского моря началась в основном с поступления речных вод в котловину. В развитии Аральского моря в голоцене выделяются две стадии: озерно-солончаковая и морская [16].

Озерно-солончаковая стадия относится к началу голоцена. Ее нижняя возрастная граница условно проводится по кровле немых верхнеплейстоценовых отложений. По разрезам донных осадков центральной акватории Аральского моря палеогеографическая обстановка этого времени представляется следующим образом. В понижениях рельефа существовали озера разной степени засоления, при пересыхании превращавшиеся в солончаки. Невыдержанный по простиранию состав отложений, среди которых присутствуют гипс и раковины ультраэвригалинных и пресноводных моллюсков, свидетельствует о неустойчивом режиме осадконакопления в периодически пересыхающих водоемах с резко меняющейся соленостью. По разрезу слоев озерно-солончако-

вой стадии достаточно четко отмечается ритмичное переслаивание пачек, литологический состав которых характеризует разные уровни водоема.

Морская стадия Арала (поздний голоцен) имеет непродолжительную историю, характеризуется резкими колебаниями его уровня и солености, и, соответственно, условиями и типом осадконакопления.

Осадки озерно-солончаковой стадии без заметного перерыва сменяются морскими отложениями, сходными по строению и составу. Их отличие заключается в уменьшении вверх по разрезу хемогенных прослоев.

Уровень морского Арала испытывал резкие разномасштабные колебания. По гипсометрическому положению морских террас на побережьях и подводным аккумулятивным формам, составу донных осадков и палинологическим материалам [17] в позднеголоценовой истории Арала устанавливаются четыре трансгрессивных и три разделяющих их регрессивных стадии [18] с колебаниями уровня до 20 м и более. Во время трансгрессий, когда уровень водоема поднимался до отметок 58 м и выше, происходило накопление в прибрежной зоне алеврито-глинистых отложений. Соленость воды, за исключением устьевых участков рек, выравнивалась и обычно не превышала 10 ‰, широкое распространение получали эвригалинные солоноватоводные и пресноводные моллюски и остракоды. Вдоль берегов активно протекали абразионные процессы.

В регрессивные эпохи, совпадавшие с жаркими аридными условиями, уровень Арала резко падал. Море мелело и разбивалось на отдельные заполненные высокоминерализованными водами (рассолами) озера либо в местах впадения рек на опресненные мелководья – плавни. В разных остаточных водоемах гидрохимические процессы идут разными путями [19]. Литологический состав регрессивных осадков весьма разнообразный. Они имеют преимущественно песчано-алевритовый хемогенный (гипс, мирабилит и др.) состав с линзами ракуши. Интересно присутствие в разрезе прослоев торфа, что связано с максимальным обмелением моря, когда его центральная котловина представляла собой обширные плавни, протянувшиеся далеко к югу и сообщавшиеся с западной котловиной двумя проливами. Соленость воды в плавнях не превышала нескольких промилле. В это время в изолированном Малом Аральском море активно накапливались хемогенные отложения, а на побережьях существовали солончаковые ландшафты.

В настоящее время на осушенном дне Аральского моря активно протекают субаэральные процессы, сходные по характеру с теми, которые отмечались при низких уровнях в голоцене, что позволяет реконструировать палеогеографическую обстановку прошлых регрессивных эпох. Тогда происходило активное образование очагов дефляции, формировались соровые солончаки, озерно-болотные угодья и крупные массивы барханных песков. Климат изменялся, увеличивалась его контрастность и засушливость, учащались пыльные бури и суховеи, во время которых вместе с пылью с обсохшего дна моря на окружающее побережье выносились сульфаты и хлориды, происходило активное засоление грунтов. Сейчас в подземных водах осушенного дна Аральского моря содержится более 11 млрд т солей [20].

Сравнительный анализ колебания уровней Аральского и Каспийского морей показывает различное во времени сочетание их уровенных позиций, часто не совпадающих по знаку [21]. Особенно отчетливо это проявляется при сравнении избербашской регрессии Каспия с древнеаральской трансгрессией Арала, а также пика туралинской трансгрессии Каспия с регрессией Арала до отметок 40,5 абс. м. По радиоуглеродным датам начало морского Арала совпадает с началом избербашской регрессии Каспия, а последующее регрессивное падение уровня с трансгрессивными пиками Каспия. Отмеченное однозначно свидетельствует о разных причинах голоценовой ритмики Каспия и Арала. Основная роль в колебаниях уровня Каспия принадлежит соотношению поступления речных вод и испарения, а для Арала можно предположить эндогенный фактор, связанный с локальным проявлением тектонических движений, обеспечивших, с одной стороны, поступление в депрессию воды крупнейших среднеазиатских рек – Амударьи и Сырдарьи, с другой стороны – возрастание эндогенного теплового потока, привноса вещества с восходящими потоками пневматолитово-гидротермальных растворов и увеличению испарения.

В гидрогеологическом отношении территория представляет собой замкнутый бессточный бассейн минерализованных грунтовых вод в песчаных отложениях четвертичного возраста [22]. Основным признаком, определяющим особенность гидрогеологической обстановки бассейна, является отсутствие стока и вследствие этого накопление

значительных запасов солей в грунтовых водах и почвах зоны аэрации, в том числе за счет соленых вод Арала. По химическому составу преобладают сульфатно-хлоридно-натриевые воды, что является признаком возможного наличия ЛГМС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Положительная оценка аральского региона Казахстана на возможное наличие литиевого гидроминерального сырья основана на критериях и признаках, установленных путем анализа литературных данных по регионам с крупными ресурсами ЛГМС. Это прежде всего условия аридного климата и преимущественно высокогорье, что в совокупности обеспечивает интенсивное испарение и концентрацию солей в осадке. Из геологических условий наибольшее внимание обращает на себя наличие признаков вулканической и гидротермальной деятельности во времена появления и существования озер в плейстоцене и голоцене и сопровождающих такую деятельность тепловых аномалий, указывающих на восходящие потоки энергии и вещества.

2. Аральский регион представляет собой тектоническую депрессию, периодически занимаемую в плейстоцене и голоцене водами Аральского моря в условиях аридного климата. Впервые обращено внимание на проявление гигантской тепловой аномалии, захватывающей весь бассейн Аральского моря. Аномалия связана с восходящими потоками эндогенной энергии и вещества. Увеличение теплового потока приводило к интенсификации испарения вод морского бассейна. При этом в морской бассейн привносились ценные элементы, включая литий, и при испарении вод накапливались в галогенных отложениях.

3. Осадочный чехол Аральской тектонической депрессии имеет ярусное строение и представлен преимущественно карбонатно-терригенными породами мезозоя и кайнозоя мощностью 3–4 км, дислоцированными в пологие складки, разделенные разрывными нарушениями. Показано, что в отношении ЛГМС интерес представляют верхнеплиоценовые и голоценовые слои.

4. В верхнеплиоценовых отложениях до глубины 500 м выделены перспективные на ЛГМС толщи соли суммарной мощностью до 85 м. Они состоят из мирабилита, галита, астраханита, глауберита, эпсомита и др., образовавшихся в регрессивную стадию водоема в связи с последовательным увеличением солености вод до 100–250 г/л.

5. Для развития Аральского моря в голоцене характерны резкие колебания его уровня и солености. Авторы считают, что регрессивные эпохи связаны с активизацией аномального теплового потока. Море мелело и разбивалось на отдельные заполненные высокоминерализованными водами озера. В них накапливались хемогенные отложения, а на побережьях существовали солончаковые ландшафты.

6. Выполненные расчеты показали, что возможные концентрации растворенных форм лития в морской воде по состоянию на 1967 г. (до начала современного обмеления Арала) составляли порядка 15 мг/л. В дальнейшем уровень моря понизился более чем на 16 м. При этом на обнажившемся дне скопились миллиарды тонн солей различных металлов, в том числе лития. Все эти соли, проникая в поровые и грунтовые воды, могли обогащать их, образуя в районе дна бывшего моря рапу, содержащую высокие концентрации солей редких металлов. Наибольшие перспективы обнаружения ЛГМС в аральском регионе связаны с подсолевой рапой и минерализованными подземными водами.

Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № госрегистрации 122020100345-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В мире развернулась борьба за литий. Кто перехватит контроль над важнейшим ресурсом экономики будущего? 2023. *LENTA.RU*. URL: https://lenta.ru/articles/2023/04/15/lit/?ysclid=liir6k67ds218418486 (дата обращения: 06.06.2023).
2. Иевлев П. Литий – легкий белый металл, который критически важен для нескольких ключевых современных отраслей. Откуда он берется, кому принадлежит, и хватит ли его всем желающим? *Бизнес. Цифровой океан. РФ*. URL: https://business.digitalocean.ru/n/belaya-neft (дата обращения: 12.10.2023).
3. Обзор рынка лития: динамика, цены, производители. 2022. *Инжиниринговый химико-технологический центр*. URL: https://ect-center.com/blog/lithium-market-2021 (дата обращения: 10.03.2023).
4. Кудрявцев П.Г., Кудрявцев Н.П. 2018. Литий: ресурсы, добыча и перспективы развития мирового рынка. *Альтернативная энергетика и экология*. 10–12: 70–81. doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.070-081
5. Рябцев А.Д. 2004. Гидроминеральное сырьё – неисчерпаемый источник лития в XXI веке. *Известия Томского политехнического университета*. 307(7): 64–70.

6. Волкова Н.И., Владимиров А.Г., Исупов В.П., Мороз Е.Н. 2012. Литиевые соляные озера Южной Америки и Центральной Азии. *Химия в интересах устойчивого развития*. 20(1): 21–26.

7. *Карта геотермического режима земной коры территории СССР.* 1978. М., Аэрогеология: 1 л. цв., 60 × 95 см.

8. Хрусталев Ю.П., Резников С.А., Туровский Д.С. 1977. *Литология и геохимия донных осадков Аральского моря.* Ростов н/Д, изд-во РГУ: 159 с.

9. Хрусталев Ю.П., Резников С.А., Чернышев С.Я. 1975. Литий, рубидий и цезий в донных осадках Аральского моря. *Доклады АН СССР*. 222(1): 231–234.

10. Батурин Г.Н., Завьялов П.О., Фридрих Я. 2015. Геохимия осадков современного Аральского бассейна. *Океанология.* 55(2): 280–290. doi: 10.7868/S0030157415020021

11. Рубанов И.В., Ишниязов Д.П., Баскакова М.А, Чистяков П.А. 1987. *Геология Аральского моря.* Ташкент, Фан: 247 с.

12. Рубанов И.В. 1980. Геологические и исторические свидетельства колебания уровня Арала. В кн.: *Колебания увлажненности Арало-Каспийского региона в голоцене.* М., Наука: 204–209.

13. Вишняков А.С. 1978. *Геология подземных вод неогеновых отложений равнинных территорий Узбекистана.* Ташкент, Фан: 115 с.

14. Пинхасов Б.И. 1984. *Неоген-четвертичные отложения и новейшая тектоника Южного Приаралья и Западных Кызылкумов*. Ташкент, Фан: 115 с.

15. Маев Е.Г., Маева С.А. 1983. Разрез донных отложений центральной части Аральского моря. В кн.: *Палеогеография Каспийского и Аральского морей в кайнозое (Материалы совещания в Московском университете в январе 1982 г.). Часть 2.* М., изд-во Московского университета: 133–143.

16. Николаев С.Д. 1995. *Изотопная палеогеография внутриконтинентальных морей*. М., ВНИРО: 125 с.

17. Вронский В.А. 1975. Голоценовая история Аральского моря по палинологическим данным. В кн.: *IV Всесоюзный симпозиум по истории озер: тезисы докладов. Том 4: История озер и внутренних морей аридной зоны.* Л.: 64–68.

18. Вайнбергс И.Г., Ульст В.Г., Розе В.К. 1972. О древних береговых линиях и колебаниях уровня Аральского моря. *Вопросы четвертичной геологии*. 8: 69–89.

19. Андрулионис Н.Ю., Завьялов П.О., Ижицкий А.С. 2022. Современная эволюция солевого состава остаточных бассейнов Аральского моря. *Океанология*. 62(1): 41–58. doi: 10.31857/S0030157422010026

20. Туремуратова А.Ш., Реймов К.Д., Алланиязов Д.О. 2022. Распределение солей в подземных водах и осушенной поверхности Аральского моря. *Universum: химия и биология*. 6(96). doi: 10.32743/UniChem.2022.96.6.13848

21. Ковалев В.В., Парада С.Г. 2013. Геологические аспекты современных изменений уровня Каспийского моря. *Вестник Южного научного центра.* 9(2): 38–46.

22. Кенжебаева С.С. 2015. Гидрогеологические условия территории нижнего течения реки Сырдарья в связи с орошением на сельскохозяйственных землях. *Научно-исследовательские публикации*. 1(3(23)): 52–62.

REFERENCES

1. [The struggle for lithium has unfolded in the world. Who will seize control of the most important resource of the economy of the future?]. 2023. *LENTA.RU.* Available at: https://lenta.ru/articles/2023/04/15/lit/?ysclid=liir6k67ds218418486 (accessed 6 June 2023). (In Russian).

2. Ievlev P. [Lithium is a lightweight white metal that is critical to several key modern industries. Where does it come from, who does it belong to, and is there enough for everyone who wants it?]. *Biznes. Tsifrovoy okean. RF.* Available at: URL: https://business.digitalocean.ru/n/belaya-neft (accessed 12 October 2023). (In Russian).

3. [Lithium market overview: dynamics, prices, manufacturers]. *Inzhiniringovyy khimiko-tekhnologicheskiy tsentr.* Available at: https://ect-center.com/blog/lithium-market-2021 (accessed 10 March 2023). (In Russian).

4. Kudryavtsev P.G., Kudryavtsev N.P. 2018. [Lithium: resources, production and prospects of world market development]. *Alternative Energy and Ecology.* 10–12: 70–81. (In Russian). doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.070-081

5. Ryabtsev A.D. 2004. [Hydromineral raw materials – an inexhaustible source of lithium in the 21st century]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta.* 307(7): 64–70. (In Russian).

6. Volkova N.I., Vladimirov A.G., Isupov V.P., Moroz E.N. 2012. [Lithium salt lakes of South America and Central Asia]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya.* 20(1): 21–26. (In Russian).

7. *Karta geotermicheskogo rezhima zemnoy kory territorii SSSR.* [*Map of the geothermal regime of the earth's crust on the territory of the USSR*]. 1978. Moscow, Aerogeologiya: 1 color sheet, 60 × 95 cm. (In Russian).

8. Khrustalev Yu.P., Reznikov S.A., Turovskiy D.S. 1977. *Litologiya i geokhimiya donnykh osadkov Aral'skogo morya.* [*Lithology and geochemistry of bottom sediments of the Aral Sea*]. Rostov-on-Don, Rostov State University: 159 p. (In Russian).

9. Khrustalev Yu.P., Reznikov S.A., Chernyshev S.Ya. 1975. [Lithium, rubidium and cesium in bottom sediments of the Aral Sea]. *Doklady Akademii nauk SSSR.* 222(1): 231–234. (In Russian).

10. Baturin G.N., Zavjalov P.O., Friedrich J. 2015. Geochemistry of sediments in the modern Aral Basin. *Oceanology.* 55(2): 253–262. doi: 10.1134/S0001437015020022

11. Rubanov I.V., Ishniyazov D.P., Baskakova M.A., Chistyakov P.A. 1987. *Geologiya Aral'skogo morya.* [*Geology of the Aral Sea*]. Tashkent, Fan: 247 p. (In Russian).

12. Rubanov I.V. 1980. [Geological and historical evidence for fluctuations in the level of the Aral Sea]. In: *Kolebaniya uvlazhnennosti Aralo-Kaspiyskogo regiona v golotsene.* [*Fluctuations in the humidity of the Aral-Caspian region in the Holocene*]. Moscow, Nauka: 204–209. (In Russian).

13. Vishnyakov A.S. 1978. *Geologiya podzemnykh vod neogenovykh otlozheniy ravninnykh territoriy Uzbekistana.* [*Geology of groundwater in Neogene deposits of the plain territories of Uzbekistan*]. Tashkent, Fan: 115 p. (In Russian).

14. Pinkhasov B.I. 1984. *Neogen-chetvertichnye otlozheniya i noveyshaya tektonika Yuzhnogo Priaral'ya i Zapadnykh*

Kyzylkumov [*Neogene-Quaternary sediments and recent tectonics of the Southern Aral Sea region and Western Kyzylkum*]. Tashkent, Fan: 115 p. (In Russian).

15. Maev E.G., Maeva S.A. 1983. [Section of bottom sediments of the central part of the Aral Sea]. In: *Paleogeografiya Kaspiyskogo i Aral'skogo morey v kaynozoe (Materialy soveshchaniya v Moskovskom universitete v yanvare 1982 g.). Chast' 2.* [*Paleogeography of the Caspian and Aral seas in the Cenozoic (Materials of a meeting at Moscow University in January 1982). Part 2*]. Moscow, Moscow University: 133–143. (In Russian).
16. Nikolaev S.D. 1995. *Izotopnaya paleogeografiya vnutrikontinental'nykh morey.* [*Isotope paleogeography of inland seas*]. Moscow, Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography: 125 p. (In Russian).
17. Vronsky V.A. 1975. [Holocene history of the Aral Sea based on palynological data]. In: *IV Vsesoyuznyy simpozium po istorii ozer: tezisy dokladov. Tom 4: Istoriya ozer i vnutrennikh morey aridnoy zony.* [*IV All-Union Symposium on the History of Lakes: abstracts of reports. Volume 4: History of lakes and inland seas of the arid zone*]. Leningrad: 64–68. (In Russian).
18. Vaynbergs I.G., Ul'st V.G., Roze V.K. 1972. [On ancient coastlines and level fluctuations of the Aral Sea]. *Voprosy chetvertichnoy geologii.* 8: 69–89. (In Russian).
19. Andrulionis N.Yu., Zavialov P.O., Izhitskiy A.S. 2022. Modern evolution of the salt composition of the residual basins of the Aral Sea. *Oceanology*. 62(1): 30–45. doi: 10.1134/S0001437022010027
20. Turemuratova A.Sh., Reymov K.D., Allaniyazov D.O. 2022. [Allocation of salt in groundwater and on drained surface of the Aral Sea]. *Universum: khimiya i biologiya.* 6(96). doi: 10.32743/UniChem.2022.96.6.13848
21. Kovalev V.V., Parada S.G. 2013. [Geological aspects of the current changes of the Caspian Sea level]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra.* 9(2): 38–46. (In Russian).
22. Kenzhebaeva S.S. 2015. [Hydrogeological conditions of the lower reaches of the Syrdarya River in connection with irrigation on agricultural lands]. *Nauchno-issledovatel'skie publikatsii.* 1(3(23)): 52–62. (In Russian).

Поступила 14.06.2023