ЗАПИСКИ РОССИЙСКОГО МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА 2026. Ч. CLV, № 3, с. 3–24

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В СОЛЯНЫХ ОЗЕРАХ ЗАПАДНОГО И СЕВЕРНОГО КРЫМА

© 2026 А. М. Бессонова[1], д. чл. М. В. Чарыкова[1*], Е. П. Каюкова[1], В. В. Чабан[2], А. А. Турченко[2], д. чл. Н. В. Платонова[1], Е. С. Сухаржевская[1]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

[2] Крымская гидрогеологическая режимно-эксплуатационная станция, Курортная ул., 4, Саки, 296500, Российская Федерация

** e-mail: m-char@yandex.ru*

Поступила в редакцию: 17.02.2026
После доработки: 25.03.2026
Принята к публикации: 15.04.2026

Аннотация. Для 13 соляных озер Западного и Северного Крыма в июне 2025 г. отобраны пробы поверхностных вод (рассолов) и находящегося с ними в контакте верхнего слоя донных отложений. Определен химический состав рассолов, на его основе установлен гидрохимический тип (сульфатный или хлоридный) и рассчитаны индексы насыщенности для основных эвапоритовых минералов. С помощью рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии охарактеризован минеральный состав донных осадков. Экспериментальные данные в целом подтверждают результаты моделирования для таких минералов, как галит, гипс и кальцит. На кристаллизацию высокомагнезиальных карбонатов помимо пересыщения рассолов очевидно, влияет более широкий диапазон факторов, в том числе биотический, который не может быть учтен при термодинамическом моделировании и требует специального изучения. Показаны основные различия между озерами двух групп — рассолы Перекопских озер по сравнению с Евпаторийскими обогащены солями магния и хлоридами, а донные осадки Перекопских озер отличаются от Евпаторийских присутствием доломита и отсутствием арагонита.

Ключевые слова: соляные озера, Крым, Евпаторийская группа, Перекопская группа, индекс насыщенности, гипс, галит, кальцит, арагонит, доломит
DOI: 10.7868/S2658435226030012

ВВЕДЕНИЕ

Физико-химическое направление изучения процессов образования природных солей развивается с середины XIX века, причем подавляющее большинство исследований в этой области базируется на термодинамическом подходе, когда в качестве теоретической основы используются диаграммы растворимости водно-солевых систем, которые по своему составу соответствуют природным рассолам. Использование таких диаграмм в данном случае является вполне оправданным, т. к. равновесие в системах, содержащих легко растворимые соли, устанавливается сравнительно быстро.

В России развитие физико-химического направления в исследовании процессов образования природных солей связано в первую очередь с изучением соляных озер, в частности, озер Крыма (Курнаков и др., 1936). Детальное изучение процесса

последовательной кристаллизации солей в бассейнах Сакского соляного промысла привело к установлению так называемого солнечного пути кристаллизации солей и построению соответствующей ему диаграммы растворимости водно-солевой системы Na^+, K^+, Mg^{2+} // Cl^-, SO_4^{2-} — H_2O (Курнаков, Николаев, 1938). В отличие от классической диаграммы, она отвечает в ряде случаев не стабильным, а метастабильным равновесиям, реализация которых осуществляется именно в природных, а не лабораторных условиях.

Наша работа продолжает серию публикаций, посвященных термодинамическому анализу условий минералообразования в соляных озерах Крыма (Каюкова и др., 2025; Чарыкова и др., 2025; Charykova et al., 2025), в которых на основании фондовых данных о составах озерных рассолов были рассчитаны индексы их насыщенности по карбонатам кальция и магния, гипсу и галиту. Отсутствие детальных данных о минеральном составе донных осадков не позволяло нам оценить адекватность результатов термодинамического моделирования реальным процессам осаждения эвапоритовых минералов в соляных озерах. Такая возможность появилась в 2025 г. после проведения полевых работ на соляных озерах Западного и Северного Крыма, в ходе которых были отобраны пробы поверхностных вод (рассолов) и находящегося с ними в контакте верхнего слоя донных отложений. Таким образом, целью настоящей работы стало определение химического состава рассолов, проведение на его основе термодинамических расчетов и сопоставление полученных теоретических прогнозов возможности осаждения солей с реальным минеральным составом донных осадков.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На территории Крымского полуострова выделяют четыре группы соляных озер: Евпаторийская, Тарханкутская, Перекопская и Керченская (рис. 1). В основу нашей статьи легли результаты исследования проб донных отложений ряда озер, принадлежащих к Евпаторийской и Перекопской группам.

Евпаторийская группа соляных озер расположена в западной части равнинного Крыма на берегу Каламитского залива Черного моря. В нее входят 15 озер (рис. 2). Все озера являются водоемами морского происхождения — от моря они отделены пересыпями, которые сложены мелкозернистыми песками и иногда гальками из обломков органогенных известняков (ракушечника) и песчаников. А. И. Дзенс-Литовский (1938) писал о морском происхождении озер Евпаторийской группы: “Озера возникли в последнюю фазу четвертичного периода и представляют собой затопленные морем балки, которые в период своего существования в виде морских заливов были расширены абразионной деятельностью Черного моря”. Вышележащие слои, отвечающие осадкам уже отшнурованных от моря озер, не содержат остатков морских организмов, кроме тех, которые попали в озера при прорывах через песчано-галечную пересыпь морской воды при штормах. Осадки, слагающие днища соляных озер, представлены илами, нередко глинистыми, неравномерно обогащенными ракушечным, песчаным и растительным материалом. Под поверхностной рапой ряда озер расположена гипсовая и известняковая корка (Курнаков и др., 1936; Понизовский, 1965; Гидроминеральные... 2024). Наиболее детально исследован минеральный состав донных осадков Сакского озера (Попов и др., 2015) — авторы описывают его как глинистый остов, насыщенный кристаллами гипса и, в меньшей степени, кристаллами кальцита, пирита, зерен кварца алевролитовой размерности, Sr-содержащего барита.

С Евпаторийскими озерами связана история развития соляной, химической промышленности и бальнеологии в Крыму. В 1827 г. на берегу Сакского озера была



Рис. 1. Карта-схема территории Крымского полуострова с указанием различных групп соляных озер
Fig. 1. Schematic map of the Crimean Peninsula showing different groups of salt lakes

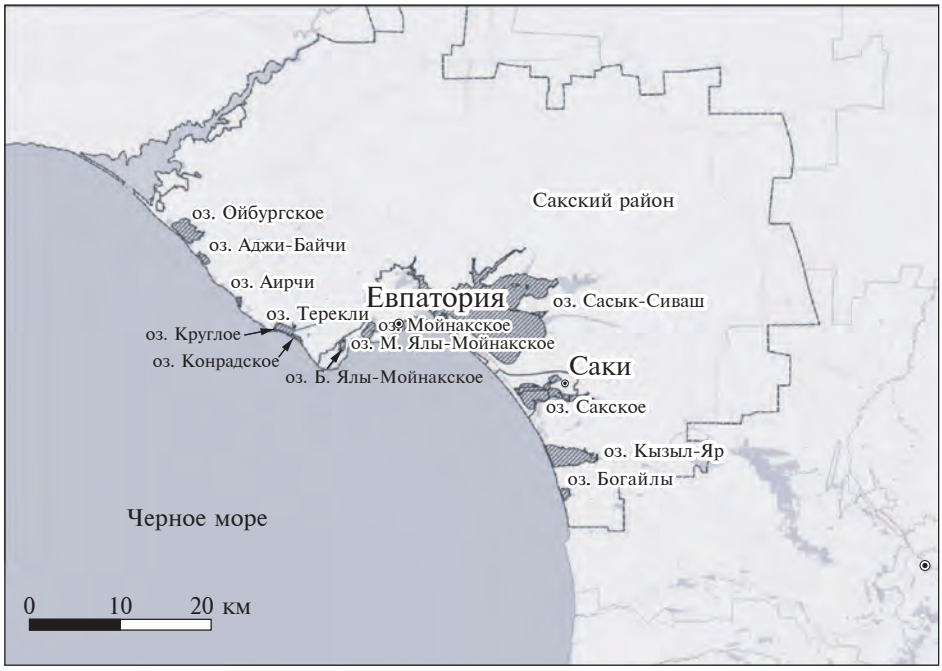


Рис. 2. Карта-схема соляных озер Евпаторийской группы
Fig. 2. Schematic map of the Yevpatoria group of salt lakes

открыта первая грязелечебница, и тем самым положено начало применения рапы и иловых отложений в лечебных целях, которое продолжается и в наше время. Крупнейшее в Крыму соляное озеро Сасык-Сиваш используется для получения пищевой, технической и косметической соли.

Перекопская группа озер расположена на Перекопском перешейке и занимает крайнюю северную часть Крымского полуострова. В ее состав входят пять крупных соляных озер — Старое, Красное, Киятское, Кирлеутское, Айгульское — и несколько мелких (рис. 3). Соляные озера Перекопской группы отличаются от других водоемов Крыма по химическому составу рапы, на что впервые обратил внимание Н. С. Курнаков (Курнаков, 1896). Относительно происхождения озер Перекопской группы существовали разные мнения (Мушкетов, 1895; Курнаков и др., 1936; Гладцин, 1939; Заморий, Молявко, 1958 и др.), однако большинство исследователей склонялось к мнению об их континентальном происхождении — берега их сложены лессовидными суглинками, в строении дна принимают участие пресноводные илы. По результатам бурения скважин в озерах определен материковый характер слагающих пород и не выявлены признаки связи с морем. А. М. Понизовский, в своей монографии (Понизовский, 1965) обобщивший данные различных авторов, считал установленным континентальное происхождение Перекопских озер.

В прошлом Перекопские озера служили источником добычи самосадочной соли, а рапа и грязи использовались в лечебных целях, но с 30-х гг. XX в. они, наряду с водами залива Западный Сиваш, стали вовлекаться в технологические циклы предприятий химической промышленности, таких как Перекопский бромный завод (в настоящее время АО “Бром”), “Крымский содовый завод” и “Крымский титан” (в настоящее время Армянский филиал ООО “Титановые инвестиции”).



Рис. 3. Карта-схема соляных озер Перекопской группы

Fig. 3. Schematic map of the Perekop group of salt lakes

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе проведения полевых работ в июне 2025 г. были отобраны пробы поверхностных вод (рассолов) и находящегося с ними в контакте верхнего слоя донных отложений восьми озер Евпаторийской группы (Сасык-Сиваш, Сакское, Аджи-Байчи, Аирчи, Конрадское, Мойнакское, Кызыл-Яр и Богайлы) и пяти озер Перекопской группы (Старое, Красное, Киятское, Кирлеутское и Айгульское). Выбор и количество представительных точек пробоотбора (от одной до четырех для каждого озера) был согласован с сотрудниками Крымской гидрогеологической режимно-эксплуатационной станции для дальнейшего сопоставления полученных данных с результатами гидрохимического опробования прошлых лет.

Анализ минерального состава образцов донных осадков и соляных отложений был выполнен методом порошковой рентгенографии с использованием автоматического порошкового дифрактометра MiniFlex II (Rigaku). Дополнительно отдельные пробы были изучены методом электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп Melytec SM 32, оснащенный энергодисперсионным спектрометром EDAX Octane Elite Super (Gatan EDAX, США)).

Нужно отметить, что пробоподготовка донных отложений соляных озер обладает спецификой в связи с тем, что они не могут быть высушены на воздухе, т. к. при этом происходит кристаллизация солей из рассолов, которыми эти отложения пропитаны. Поэтому перед проведением химического анализа в соответствии с опубликованной методикой (Методы анализа... 1965) пробы тщательно высушивались между слоями фильтровальной бумаги для возможно более полного удаления влаги. Каждая из подготовленных таким образом проб была разделена на две части: одна исследовалась непосредственно после пробоподготовки, вторая использовалась для приготовления водной вытяжки. Приготовление вытяжек также проводилось в соответствии с методикой (Методы анализа... 1965) — навески донных отложений заливались горячей дистиллированной водой в соотношении 1:20 и выдерживались при нагревании в течение одного часа. Рентгенофазовый анализ донных осадков проводился в двух вариантах — как для образцов, высушенных между слоями фильтровальной бумаги, так и для тех же образцов после приготовления из них водных вытяжек.

Химический анализ рассолов и водных вытяжек выполнялся по стандартным методикам. Ионы Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^{-}, HCO_3^{-}, CO_3^{2-} определяли титриметрическим методом, ион SO_4^{2-} — гравиметрическим методом, Na^{+} и K^{+} анализировали методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Для оценки степени насыщенности рассолов и возможности кристаллизации солей выполнялось термодинамическое моделирование с использованием программного комплекса Geochemist's Workbench (GWB9) с подключением базы исходных термодинамических данных thermohmw.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены результаты химического анализа рассолов, а именно содержания главных ионов (Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}, CO_3^{2-}), которые определяют химический тип рассолов и возможность кристаллизации основных эвапоритовых минералов. Там же представлены рассчитанные нами коэффициенты метаморфизации, введенные М. Г. Валяшко в развитие идей Н. С. Курнакова, исходя из данных о совместной растворимости солей. По этим коэффициентам определяют принадлежность воды к одному из главных химических типов — карбонатному, сульфатному или хлоридному (табл. 2). Подробнее о коэффициентах метаморфизации и способах их вычисления см. (Валяшко, 1962; Каюкова и др., 2025).

Таблица 1. Химический состав и коэффициенты метаморфизации озерных вод (рассолов) (июнь 2025 г.)

Table 1. Chemical composition and coefficients of metamorphization of lake brines (June 2025)

Озеро	Содержания главных ионов, г/л								pH	Сумма солей, г/л	Коэффициенты метаморфизации			
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}			K_1	K_2	K_3	K_4
Евпаторийская группа														
Аджи-Байчи	82.83	3.94	13.13	0.92	149.60	38.08	0.94	–	7.69	289.44	0.01	0.72	17.62	0.34
Аирчи	34.14	1.58	4.52	0.42	66.29	15.12	0.74		8.55	122.81	0.03	0.83	15.61	0.58
Конрадское	76.30	3.08	10.20	0.64	126.91	23.97	0.51		7.94	241.62	0.01	0.58	15.90	0.26
Мойнакское (южная часть)	17.33	0.89	2.59	0.99	27.83	10.84	0.28	0.05	8.31	60.79	0.02	0.88	4.70	0.13
Мойнакское (центральная часть)	16.70	0.89	2.41	0.98	27.65	10.84	0.35	–	8.32	59.82		0.94	4.73	0.12
Мойнакское (северная часть)	5.30	0.29	0.79	0.91	9.39	4.95	0.26		8.41	21.89	0.04	0.97	2.36	0.09
Сасык-Сиваш (“Сольпром”)	85.10	3.47	15.58	0.44	177.96	25.69	0.33	0.15	7.66	308.71	0.01	0.42	24.85	0.47
Сасык-Сиваш (пресная часть)	2.82	0.09	0.55	0.52	5.60	2.53	0.24	–	8.41	12.34	0.06	0.80	2.20	0.15
Сасык-Сиваш (соленая часть)	82.68	2.69	13.63	0.48	158.11	21.94	0.19	0.25	7.60	279.97	0.01	0.41	19.57	0.48
Сакское (восточный водоем)	59.11	2.49	8.83	1.08	114.86	19.12		0.14	7.86	205.82		0.52	7.54	0.15
Кызыл-Яр	5.84	0.10	0.98	1.01	11.88	3.87	0.25	–	8.20	23.93	0.03	0.64	1.68	0.08
Богайлы	23.97	0.68	4.31	1.11	42.36	1.40	0.31		7.62	74.15	0.01	0.08	0.62	0.09
Перекопская группа														
Старое (южная часть)	51.63	7.86	37.92	0.40	163.07	61.31	0.12	–	5.9	322.32	0.001	0.41	64.10	0.10
Старое (северная часть)	57.05	7.24	38.47	0.28	172.29	57.85	0.46		6.33	333.63	0.002	0.38	86.79	0.54
Красное (северная часть)	49.41	0.71	0.96	58.80	192.14	0.31	0.05	0.18	9.64	302.55		0.004	0.005	0.002
Красное (южная часть)	43.68	0.16	16.49	0.92	108.48	15.85	0.46	0.06	7.55	186.10	0.01	0.24	7.40	0.21
Киятское (северная часть)	68.67	0.41	24.00	0.40	167.32	21.87	0.43	0.28	7.42	283.38			23.65	0.82
Кирлеутское	61.87	0.15	14.02	0.64	136.13	19.70		–	7.47	232.93		0.35	13.07	0.22
Айгульское	53.53	0.23	13.99	2.28	134.71	7.17	0.28		7.31	212.19	0.00	0.12	1.35	0.04

Таблица 2. Характерные признаки принадлежности рассолов к одному из главных химических типов

Table 2. Characteristic features of brines corresponding to the main chemical types

Химический тип	Подтип	Коэффициенты метаморфизации			
		K_1	K_2	K_3	K_4
Карбонатный (содовый)	–	> 1	$\gg 1$	$\gg 1$	$\gg 1$
Сульфатный	Сульфатно-натриевый	$\leqslant 1$	$\geqslant 1$	$\gg 1$	$\neq 1$
Сульфатный	Сульфатно-магниевый	$\ll 1$	$\leqslant 1$	$\gg 1$	$\neq 1$
Хлоридный	–	$\ll 1$	$\ll 1$	$\leqslant 1$	< 1

Все изученные нами соляные озера Евпаторийской группы относятся к сульфатному типу, сульфатно-магниевому подтипу. На рис. 4*а* и более детально на рис. 5 представлена диаграмма растворимости четырехкомпонентной взаимной системы Na^+, Mg^{2+} // Cl^-, SO_4^{2-}–H_2O при 25 °С, с помощью которой обычно наглядно изображают состав рассолов сульфатного типа и моделируют протекающие в них процессы эвапоритовой седиментации. На диаграмму нанесены фигуративные точки поверхностных вод озер, представленных в табл. 1. Видно, что все они лежат в поле кристаллизации галита, за исключением вод северной части озера Мойнакское — для него фигуративная точка попадает на стабильной диаграмме на границу с полем кристаллизации блёдита ($Na_2Mg(SO_4)_2{\cdot}4H_2O$). Однако, как известно (Курнаков, Николаев, 1938; Валяшко, 1962), в природных условиях часто реализуется метастабильное равновесие (солнечный путь кристаллизации), при котором блёдит не образуется — эти равновесия показаны на рис. 3 пунктирными линиями. В случае метастабильных равновесий фигуративные точки вод всех озер лежат в поле кристаллизации галита. Это означает, что при их испарении первой хорошо растворимой солью, которая выпадает в осадок, является галит. Положение фигуративных точек на диаграмме в целом мало изменилось по сравнению с данными, относящимися к августу–октябрю 2016 г. (Каюкова и др., 2025; Чарыкова и др., 2025). Оно заметно отличается лишь для озера Богайлы и в меньшей степени Кызыл-Яр, которые, как известно (Гидроминеральные... 2024), подвергаются антропогенному воздействию.

На тех же рис. 4*а* и 5 можно видеть расположение фигуративных точек рассолов большинства озер Перекопской группы. Все они, за исключением северной части озера Красное, также принадлежат к сульфатному типу, сульфатно-магниевому подтипу, хотя для Айгульского озера значение коэффициента K_3 близко к единице, что свидетельствует о приближении к хлоридному типу. По сравнению с озерами Евпаторийской группы Перекопские озера обогащены солями магния и хлоридами. Последнее наиболее характерно для Айгульского озера, что соответствует его приближению к хлоридному типу.

Процессы кристаллизации солей в бассейнах хлоридного типа обычно изображаются с помощью системы Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} // Cl^-–H_2O (Валяшко, 1962). Подавляющую часть этой диаграммы занимает поле кристаллизации NaCl, а нонвариантные точки, линии моновариантных равновесий и поля кристаллизации остальных твердых фаз "прижаты" к стороне треугольника, отвечающей тройной системе $MgCl_2$–$CaCl_2$–H_2O. Помимо галита, в этой системе на поздних стадиях эвапоритовой седиментации могут кристаллизоваться бишофит ($MgCl_2{\cdot}6H_2O$), тахгидрит ($CaMg_2Cl_6{\cdot}12H_2O$) и антарктикит ($CaCl_2{\cdot}6H_2O$), но первой (и основной) хорошо растворимой солью, осаждающейся при испарении рассолов хлоридного типа, всегда является галит. На рис. 4*б* изображена диаграмма растворимости системы Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} // Cl^-–H_2O при 25 °С, на которую нанесена фигуративная точка рассолов северной части Красного озера — единственного, которое, согласно данным 2025 г., относится к хлоридному типу.

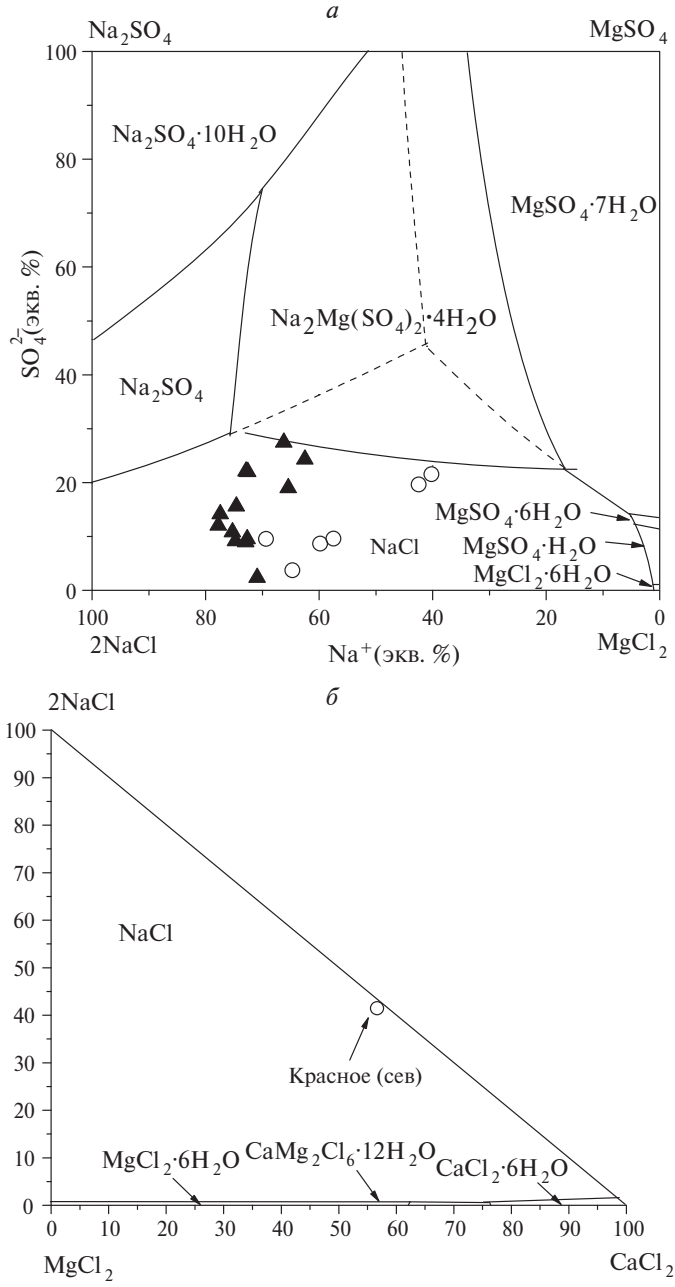


Рис. 4. Фигуративные точки рассолов озер на диаграммах растворимости четырехкомпонентной взаимной системы Na^+, Mg^{2+} // Cl^-, SO_4^{2-}–H_2O (*а*) и четырехкомпонентной системы с общим анионом Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} // Cl^- –H_2O (*б*) при 25 °С. Треугольники — рассолы озер Евпаторийской группы, кружки — рассолы озер Перекопской группы. Диаграмма построена по данным (Справочник... 1975); сплошные линии отвечают стабильным равновесиям, пунктирные — метастабильным

Fig. 4. Lake brine compositions on the solubility diagrams of the four-component reciprocal system Na^+, Mg^{2+}// Cl^-, SO_4^{2-}–H_2O (*a*) and the four-component system with a common anion Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} // Cl^-–H_2O (*б*) at 25 °C. Triangles represent brines from the Yevpatoria group of lakes, and circles represent brines from the Perekop group of lakes. The diagram is constructed based on data from (Spravochnik... 1975); solid lines correspond to stable equilibria, and dashed lines to metastable equilibria

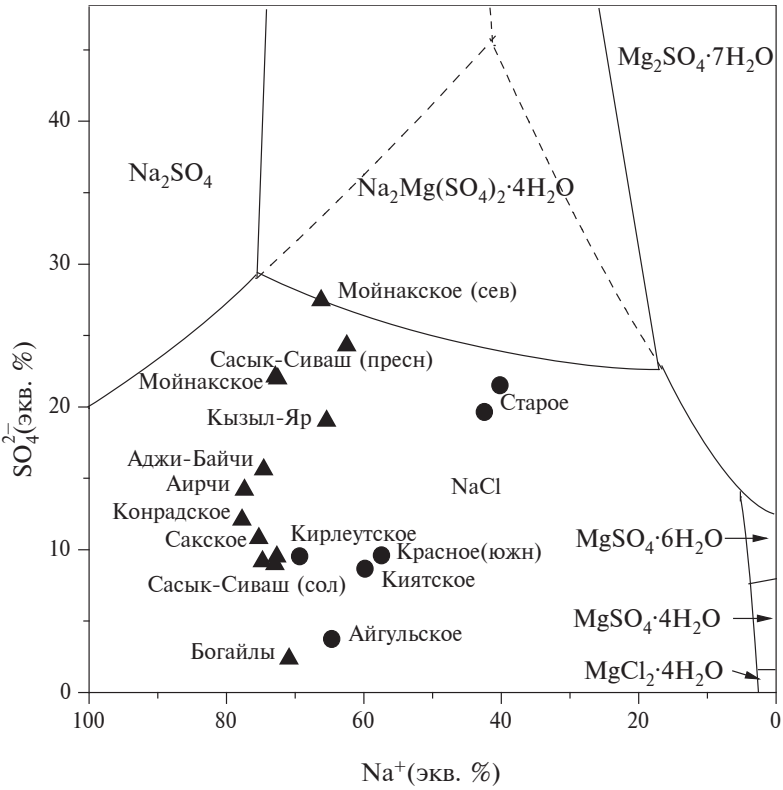


Рис. 5. Увеличенный фрагмент диаграммы растворимости четырехкомпонентной взаимной системы Na^+, Mg^{2+}// Cl^-, SO_4^{2-}–H_2O при 25 °C

Fig. 5. Enlarged section of the solubility diagram for the four-component reciprocal system Na^+, Mg^{2+}// Cl^-, SO_4^{2-}–H_2O at 25 °C

Расположение фигуративных точек рассолов Перекопских озер на рис. 4 и 5 согласуется с данными, относящимся к августу–октябрю 2016 г. (Charykova et al., 2025), и не совпадает с типизацией этих озер 1916 г. (Курнаков, Жемчужный, 1917), по которой озера Старое, Красное, Киятское, Айгульское относились к хлоридным. Как уже отмечалось в нашей предыдущей работе (Charykova et al., 2025), такие изменения соотношения ионов в рассолах озер Перекопской группы, очевидно, связаны с интенсивным техногенным воздействием на них — некоторые из этих озер включены в технологические циклы химического производства, служат в качестве накопителей сырья или отходов химического производства брома, соды и т. д. Таким образом, не удивительно, что озера Красное, Старое, Киятское по соотношению солевых компонентов в рассолах значительно отличаются от своего состояния до начала производственной деятельности и даже изменили тип своих рассолов. При этом нужно иметь в виду, что рассолы северной части озера Красное, хотя и принадлежат по-прежнему к хлоридному типу, на самом деле тоже далеки от изначального природного состояния, поскольку эта часть озера превращена в накопитель-испаритель АО “Крымский содовый завод” — очевидно, с этим связано и аномально высокое значение pH озера Красное (9.64).

Поскольку графическое изображение диаграмм фазовых равновесий на рис. 4 и 5 ограничивает число компонентов системы и не учитывает, в частности, наличия ионов Ca^{2+}, HCO_3^-, CO_3^{2-}, мы не можем с помощью этой диаграммы оценить возможность

кристаллизации гипса, кальцита и других кальцийсодержащих или карбонатных солей. Сделать это позволяет термодинамическое моделирование, при котором в рамках системы Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} // Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-} $-H_2O$ оценивается степень насыщенности рассолов по всем солям, кристаллизация которых возможна в данной системе. Наглядно изобразить такую многокомпонентную систему невозможно, и для моделирования используется индекс насыщенности *SI*, под которым понимается следующая величина:

$$SI = \lg\left[\frac{a_M^{\nu_M} a_X^{\nu_X}}{ПР_{MX}}\right]^{1/(\nu_M+\nu_X)},$$

где M — катион, X — анион, a_M и a_X — активности катионов и анионов, ν_M и ν_X — числа ионов M и X в формуле соли MX, а $ПР_{MX}$ — величина ее произведения растворимости. Если $SI > 0$, произведение активностей ионов в растворе (в соответствующих степенях) превышает произведение растворимости, и раствор является пересыщенным. Значение $SI < 0$ означает, что раствор не насыщен, а $SI = 0$ отвечает равновесию раствора с данной твердой фазой.

Индексы насыщенности рассолов изученных нами озер представлены на рис. 6—7 и в табл. 3. Они рассчитаны по всем солям, включенным в базу данных термодинамического моделирования, кристаллизация которых возможна при данном составе раствора — в случае рассматриваемой системы их 34. Однако на рисунках приведены величины *SI* лишь по тем минералам, осаждение которых является наиболее вероятным. Это, прежде всего, галит, в поле кристаллизации которого попадают составы рассолов большинства озер, а также гипс и малорастворимые карбонаты: кальцит, арагонит, доломит, магнезит.

Из результатов расчета следует, что рассолы (воды) практически всех озер — даже наименее соленых — пересыщены по карбонатам кальция и магния. Исключение составляет только озеро Старое в своей южной части. Можно заметить, что фигуративные точки его рассолов занимают несколько обособленное место на диаграмме растворимости — в их ионном составе наибольшее содержание магния (в экв.%), но наименьшее содержание хлорид-иона из всех Перекопских озер (см. рис. 5). Ни для одного из изученных озер не получено положительного индекса насыщенности по галиту, что неудивительно, т. к. галит, будучи хорошо растворимой солью, не склонен к образованию пересыщенных растворов. Наиболее близки к насыщению рассолы озера Сасык-Сиваш (его соленой части) и озера Старое, а также Аджи-Байчи и северных частей озер Красное и Киятское. Наконец, пересыщение или насыщение по гипсу наблюдается для рассолов Евпаторийских озер, за исключением Аирчи, Богайлы и пресной части озера Сасык-Сиваш, а также для всех озер Перекопской группы.

Перейдем к сопоставлению результатов термодинамического моделирования с данными о реальном минеральном составе верхнего слоя донных осадков, находящегося в непосредственном контакте с рассолами, насыщенность которых мы определили. В табл. 3 приведены результаты рентгенофазового анализа.

Все осадки (за исключением северной части озера Красное) представляют собой илистые однородные отложения тонкозернистой структуры от светло- до темно-бурого цвета (в отдельных случаях более крупнозернистые песчанистые с включениями раковинного детрита), пропитанные рассолом. Рентгенофазовый анализ показал наличие галита почти во всех пробах, хотя обильное осаждение галита было замечено нами только в озере Сасык-Сиваш, вблизи предприятия “Сольпром”. Очевидно, что небольшое количество галита могло образовался в результате испарения остаточного рассола в процессе съемки. В связи с этим был выполнен рентгенофазовый анализ промытых проб, которые уже не содержали галита (он целиком перешел в водную

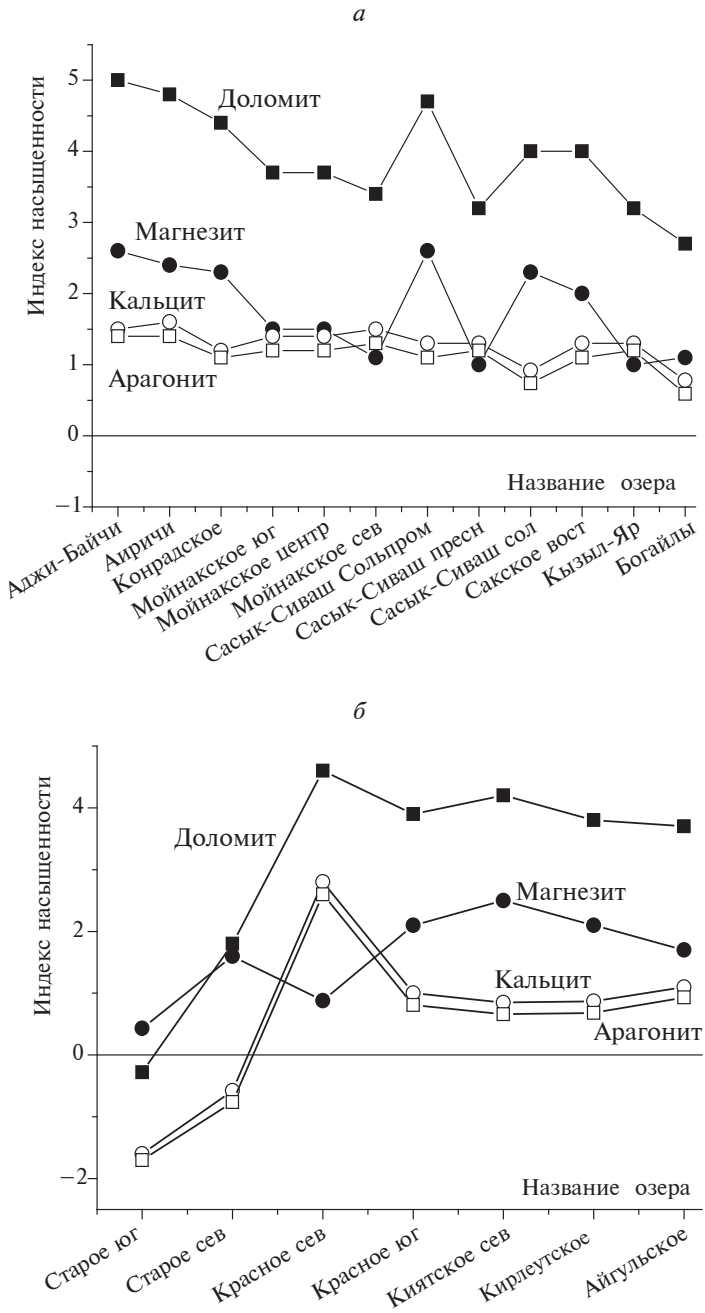


Рис. 6. Степень насыщенности рассолов озер Евпаторийской (*а*) и Перекопской (*б*) групп по кальциту (полые кружки), арагониту (полые квадраты), доломиту (залитые квадраты) и магнезиту (залитые кружки)

Fig. 6. Saturation degree of brines from the Yevpatoria (*а*) and Perekop (*б*) groups of lakes with respect to calcite (open circles), aragonite (open squares), dolomite (filled squares), and magnesite (filled circles)

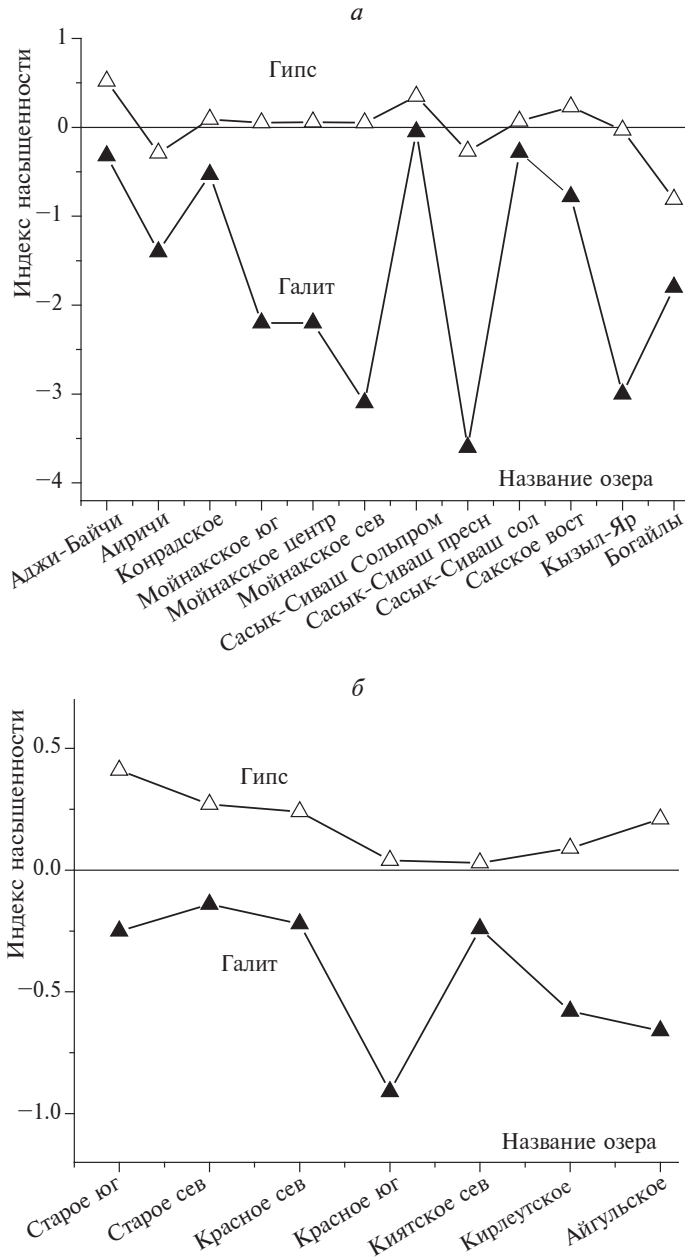


Рис. 7. Степень насыщенности рассолов озер Евпаторийской (*а*) и Перекопской (*б*) групп по гипсу (полые треугольники) и галиту (залитые треугольники)

Fig. 7. Saturation degree of brines from the Yevpatoria (*а*) and Perekop (*б*) groups of lakes with respect to gypsum (open triangles) and halite (filled triangles)

Таблица 3. Оценка минерального состава донных осадков

Table 3. Assessment of mineral compositions of bottom sediments

Озеро	Степень насыщенности рассолов						Минеральный состав карбонатов (по данным рентгенофазового анализа)				Mg/Ca в рассоле
	Доломит	Магнезит	Кальцит	Арагонит	Гипс	Галит	Доломит	Кальцит	Магнезиальный кальцит	Арагонит	
Евпаторийская группа											
Аджи-Байчи	5.0	2.6	1.5	1.4	0.52	–0.32			–		23.5
Аирчи	4.8	2.4	1.6		–0.29	–1.4					17.8
Конрадское	4.4	2.3	1.2	1.1	0.09	–0.53			+		26.3
Мойнакское (южная часть)	3.7	1.5	1.4	1.2	0.05	–2.2				+	4.31
Мойнакское (центральная часть)					0.06			+			4.06
Мойнакское (северная часть)	3.4	1.1	1.5	1.3	0.05	–3.1	–				1.42
Сасык-Сиваш (“Сольпром”)	4.7	2.6	1.3	1.1	0.35	–0.05			–		58.4
Сасык–Сиваш (пресная часть)	3.2	1.0		1.2	–0.27	–3.6				–	1.76
Сасык-Сиваш (соленая часть)	4.0	2.3	0.92	0.74	0.07	–0.28				+	46.8
Сакское (восточный водоем)		2.0	1.3	1.1	0.23	–0.78					13.5
Кызыл-Яр	3.2	1.0	1.3	1.2	–0.03	–3.0		+		–	1.61
Богайлы	2.7	1.1	0.78	0.59	–0.81	–1.8			+		6.41
Перекопская группа											
Старое (южная часть)	–0.28	0.43	–1.6	–1.7	0.41	–0.25	+			–	156.4
Старое (северная часть)	1.8	1.6	–0.58	–0.76	0.27	–0.14					226.6
Красное (северная часть)	4.6	0.88	2.8	2.6	0.24	–0.22	–			+	0.03
Красное (южная часть)	3.9	2.1	1.0	0.81	0.04	–0.91		+	–		29.6
Киятское (северная часть)	4.2	2.5	0.85	0.66	0.03	–0.24	+			–	98.9
Кирлеутское	3.8	2.1	0.87	0.68	0.09	–0.58					36.1
Айгульское	3.7	1.7	1.1	0.93	0.21	–0.66					10.1

вытяжку) и в некоторых случаях содержали меньше гипса (перешел в водную вытяжку частично). Пример двух вариантов дифрактограммы можно видеть на рис. 8.

По результатам рентгенофазового анализа все пробы содержат, прежде всего, терригенную составляющую, представленную кварцем, альбитом, микроклином, мусковитом, каолинитом и клинохлором. В пробах из озер Аджи-Байчи и Конрадское обнаружен также амфибол. Карбонатная часть донных осадков включает кальцит (во всех пробах), арагонит (в пробах большинства Евпаторийских озер), магнезиальный кальцит (в некоторых пробах) и доломит (в пробах Перекопских озер). Магнезит не был найден ни в одной из отобранных проб.

Из данных табл. 3 видно, что теоретический прогноз возможности осаждения солей и реальный состав солевых минералов совпадают не во всех случаях. Так, рассолы ряда озер очень далеки от насыщения галитом, но на дифрактограммах непромытых проб присутствуют его дифракционные максимумы. Предположение о том, что они отвечают галиту, который кристаллизовался в ходе рентгенофазового анализа из остаточных пропитывающих рассолов, нашло свое подтверждение в результате исследования методом электронной микроскопии. Так, на рис. 9 в качестве примера представлены СЭМ-изображения, из которых видно, что галит присутствует в очень

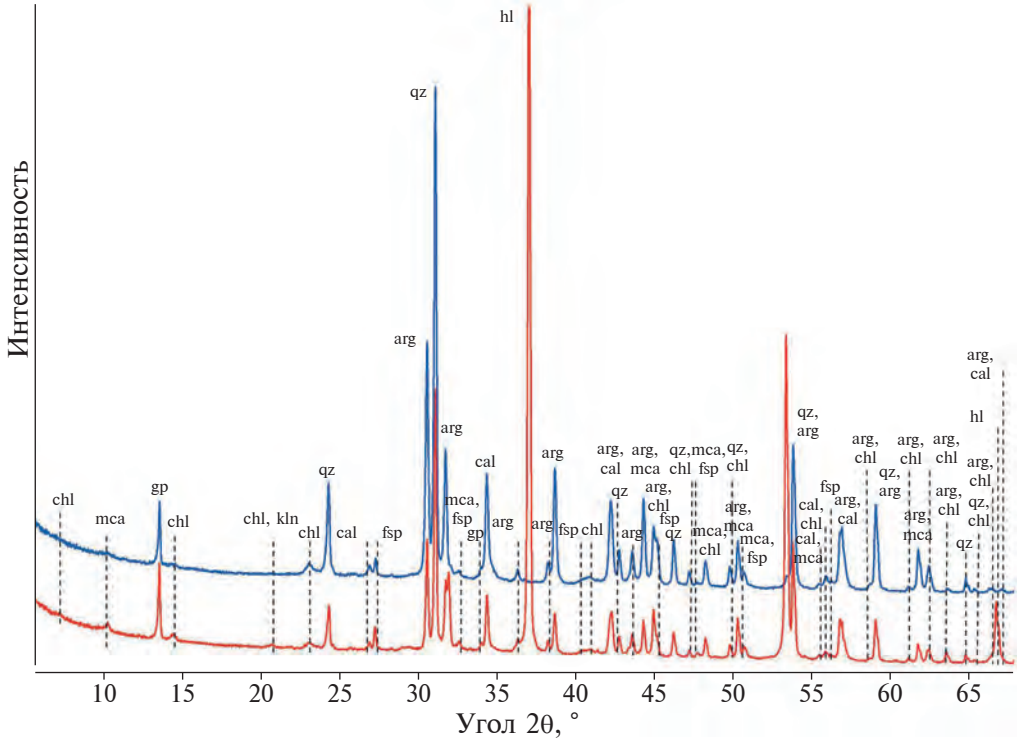


Рис. 8. Дифрактограммы проб донных осадков озера Сасык-Сиваш — до приготовления водной вытяжки (красный цвет) и после (синий цвет). Показаны основные диагностические дифракционные максимумы минералов: arg — арагонит, hl — галит, gp — гипс, cal — кальцит, kln — каолинит, qz — кварц, mca — слюда, fsp — K-Na полевые шпаты, chl — хлорит

Fig. 8. X-ray diffraction patterns of bottom sediment samples from Lake Sasyk-Sivash — before (red) and after (blue) preparation of aqueous extract. The main diagnostic diffraction maxima of minerals are shown: arg — aragonite, hl — halite, gp — gypsum, cal — calcite, kln — kaolinite, qz — quartz, mca — mica, fsp — K-Na feldspars, chl — chlorite

небольших выделениях — чаще всего в виде налетов, корочек, что не соответствует масштабу осаждения хорошо растворимой соли, если бы раствор был насыщенным. Интересна морфология выделений NaCl на рис. 9*б* — в литературе отмечается (Сонненфелд, 1988), что галит, заполняющий трещины и небольшие пустоты, имеет волокнистый облик, что мы и видим на этом рисунке. Лишь в пробе из озера Аджи-Байчи найдены единичные кристаллы галита размером до 200 мкм, но даже они вряд ли могут быть признаком его заметного осаждения в масштабах озера. Таким образом, расчетная оценка насыщения рассолов галитом дает результаты, вполне согласующиеся с реальной картиной в исследованных озерах.

Оценка насыщенности рассолов по гипсу также в целом не противоречит реальному минеральному составу. Так, все рассолы Перекопских озер пересыщены или насыщены по гипсу. В результате рентгенофазового анализа он найден во всех пробах донных осадков, кроме озер Кирлеутское и Айгульское, но и в этих пробах кристаллы гипса присутствуют на СЭМ-изображениях (рис. 10). Что касается Евпаторийских озер, то здесь несовпадение расчета с данными рентгенофазового анализа мы видим только для озера Богайлы — его рассолы не насыщены по гипсу, но экспериментально он был обнаружен. Возможно, найденный в донных осадках гипс образовался в прошлом из более минерализованных рассолов — известно, что озеро Богайлы подверглось распреснению в результате антропогенного воздействия (Гидроминеральные... 2024;

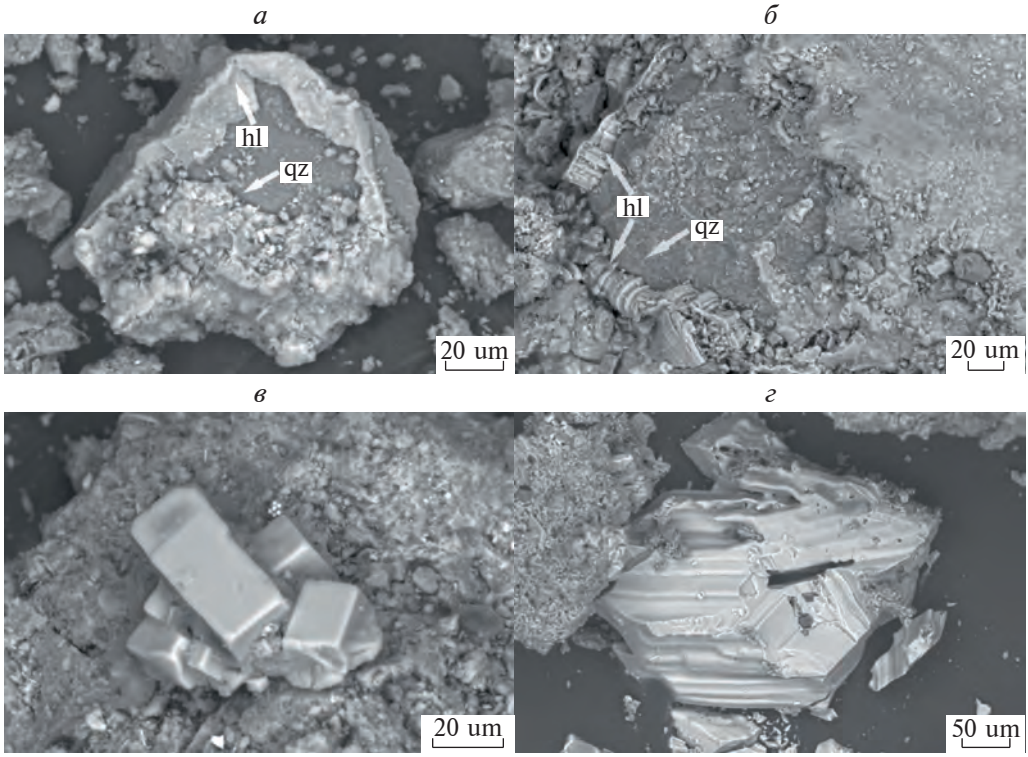


Рис. 9. СЭМ-изображения кристаллов галита: *а* — корочка на зерне кварца (Киятское озеро), *б* — волокна между зернами (Киятское озеро), *в* и *г* — единичные кристаллы (озера Конрадское и Аджи-Байчи). Здесь и далее фото в режиме BSE

Fig. 9. Backscattered electron images of halite crystals: *а* — crust on a quartz grain (Kiyatskoye Lake), *б* — fibrous growth between grains (Kiyatskoye Lake), *в* and *г* — individual crystals (Konradskoye and Adzhi-Baichi lakes)

Каюкова и др., 2025), а в пресной воде гипс плохо растворим. Примеры разнообразной морфологии агрегатов гипса в различных озерах можно видеть на рис. 10. Причинами этого разнообразия, очевидно, являются различия в составе минералообразующей среды — известно, что на форму кристаллов гипса, осаждающегося из растворов, оказывают влияние pH, присутствие посторонних ионов и органических веществ (Сонненфелд, 1988; Кузьмина и др., 2015). Представленные на рис. 10*а* и 10*б* пластинчатые агрегаты гипса из озер Киятское и Кирлеутское обладают сходством, поскольку образуются из рассолов, близких по общей концентрации солей, pH и соотношению главных ионов — это можно видеть из данных табл. 1 и расположения фигуративных точек озер на рис. 5. Совершенно другая минералообразующая среда характерна для образца из северной части озера Красного (изображение гипса на рис. 10*в*) — аномальное значение pH, высокая концентрация ионов кальция и низкая концентрация сульфат-ионов. Наконец, кристаллы гипса, СЭМ-изображение которых представлено на рис. 10*г*, содержатся в донном осадке озера Аджи-Байчи. Как видно из положения фигуративной точки этого озера на рис. 5, в его ионом составе концентрация сульфат-ионов выше, чем в озерах Киятском и Кирлеутском (и тем более выше, чем в хлоридных рассолах озера Красного). Это значительно меньшее по площади и очень мелководное озеро; уровень рассолов в нем и, как следствие, общая концентрация солей, испытывают заметные изменения во внутригодовом и многолетнем циклах. В теплое время года здесь создаются благоприятные условия для развития одноклеточных водорослей

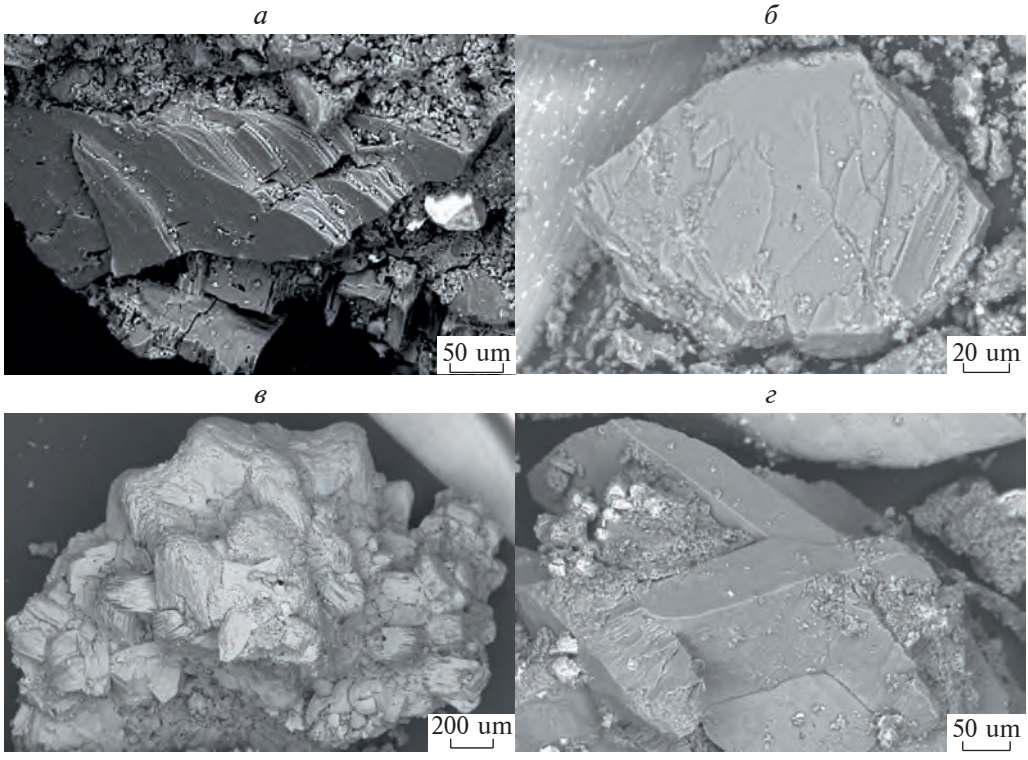


Рис. 10. СЭМ-изображения агрегатов гипса: *а* — Киятское озеро (северная часть), *б* — Кирлеутское озеро, *в* — Красное озеро (северная часть), *г* — озеро Аджи-Байчи

Fig. 10. Backscattered electron images of gypsum aggregates: *а* — Lake Kiyatskoye (northern part), *б* — Lake Kirleutskoye, *в* — Lake Krasnoye (northern part), *г* — Lake Adzhi-Baichi

и бактериопланктона, что приводит к обогащению рассолов органическими веществами (Гидроминеральные... 2024).

Сопоставление результатов термодинамической оценки насыщенности рассолов карбонатами кальция и магния с реальным минеральным составом дало неоднозначные результаты. Положительные значения индекса насыщенности по ним наблюдаются практически для всех изученных рассолов, однако следует иметь в виду, что расчет активностей ионов Ca^{2+}, Mg^{2+}, CO_3^{2-} и сравнение их произведений с произведениями растворимости кальцита, арагонита, доломита и магнезита выполняется по отдельности для каждого минерала. Полученные положительные значения индексов свидетельствуют о термодинамической возможности образования каждого минерала, но не позволяют судить о последовательности их кристаллизации. Между тем эта последовательность очень важна — ведь каждый из перечисленных карбонатов, осаждаясь, обедняет рассол анионами CO_3^{2-} и катионами Ca^{2+} или/и Mg^{2+}, понижая, таким образом, значение индекса насыщенности по остальным карбонатам.

В нашей предыдущей работе (Чарыкова и др., 2025) мы сделали попытку прогнозировать набор конкретных карбонатов кальция и магния, которые могут осаждаться из рассолов Евпаторийских озер, исходя из молярного соотношения ионов магния и кальция в рассолах. При этом мы опирались на данные ряда авторов (например, Muller et al., 1972; Jones et al., 2009; Deocampo, Jones, 2014). Они приводят интервалы соотношения Mg/Ca, при которых может осаждаться кальцит (Mg/Ca < 2), магнезиальный кальцит (2 < Mg/Ca < 7), арагонит (Mg/Ca > 12), доломит (Mg/Ca > 7) и магнезит (Mg/Ca > 40). Авторами работы (Muller et al., 1972) были изучены пробы ила, отобранные из 25 озер, различающихся по солености, климатическим условиям, размерам и т. п. Согласно их выводам, доломит и магнезит в озерных осадках являются вторичными минералами, причем образуются только в тех случаях, когда в качестве первичного минерала осаждается магнезиальный кальцит. При этом для преобразования магнезиального кальцита в магнезит необходимы не только условие Mg/Ca > 40, но и очень высокая концентрация магния в рассоле (> 34 г/л).

Следует, однако, учитывать, что для малорастворимых солей часто реализуется метастабильное равновесие, когда пересыщение может быть весьма устойчивым и не приводить к образованию твердой фазы. Сказанное в полной мере относится к карбонатам кальция и магния (Берг, Борисова, 1960; Сонненфелд, 1988). Помимо пересыщения и соотношения ионов Mg и Ca, целый ряд факторов влияет на вероятность осаждения как карбонатов в целом, так и конкретных минералов в частности. Это биотический фактор, температура, pH минералообразующей среды, присутствие различных ионов, содержание органического вещества. Таким образом, как отмечает П. Сонненфелд в своей монографии (1988), самопроизвольное неорганическое осаждение карбонатов в результате одного лишь пересыщения является редким событием, а основная масса морских карбонатов имеет биогенное происхождение. Помимо этого найденные в донных осадках карбонаты кальция и магния могут быть не первичными минералами, а продуктами изменения гипса или ангидрита, образующимися в бескислородной обстановке в результате деятельности микроорганизмов, либо результатом преобразования известняков, контактирующих с рассолами.

По результатам рентгенофазового анализа (табл. 3) во всех исследованных нами пробах обнаружен кальцит. Арагонит (по всей видимости, обломки раковин) найден в донных осадках Евпаторийских озер, имеющих морское происхождение, и лишь в одной пробе из Перекопских озер — в северной части озера Красное. Здесь следует еще раз отметить, что это озеро (в своей северной части) занимает совершенно особое положение — только его рассолы принадлежат к хлоридному типу и имеют аномально высокое значение pH 9.64. По всей видимости, все эти особенности связаны с вовлечением озера в технологический цикл АО “Крымский содовый завод”. Водная толща

этого водоема выделяется среди других озер красивым ярко-голубым цветом, а верхний слой донных отложений представляет собой чрезвычайно крепкую корку, состоящую из гипса с примесью кальцита, арагонита и кварца. Отобрать дополнительную пробу из-под этой корки нам не удалось.

Как видно из табл. 3, в некоторых Евпаторийских озерах обнаружен магнезиальный кальцит, но ни в одном из них не найден доломит. Зато он обнаружен в пробах всех Перекопских озер, за исключением уже упоминавшейся, отличающейся от всех пробы из северной части озера Красное. Молярные отношения Mg/Ca для всех изученных нами рассолов приведены в табл. 3. Можно видеть, что, например, в озерах Старое, Киятское, Сасык-Сиваш оно превышает 40, причем в озере Старое концентрация магния в рассоле превышает 34 г/л, что, по мнению авторов работы (Muller et al., 1972), является условием осаждения магнезита. Однако магнезит не был найден ни в одной из исследованных проб, в том числе и в этой. Арагонит, напротив, установлен как в озерах с соотношением Mg/Ca > 12 (Аджи-Байчи, Аирчи, Конрадское, Сакское, Сасык-Сиваш), так и в озерах, где это соотношение значительно меньше (Мойнакское, Кызыл-Яр, Богайлы).

Таким образом, можно предположить не эвапоритовое, а биогенное происхождение арагонита и магнезиального кальцита, найденных преимущественно в Евпаторийских озерах морского генезиса. На рис. 11 представлены примеры СЭМ-изображений

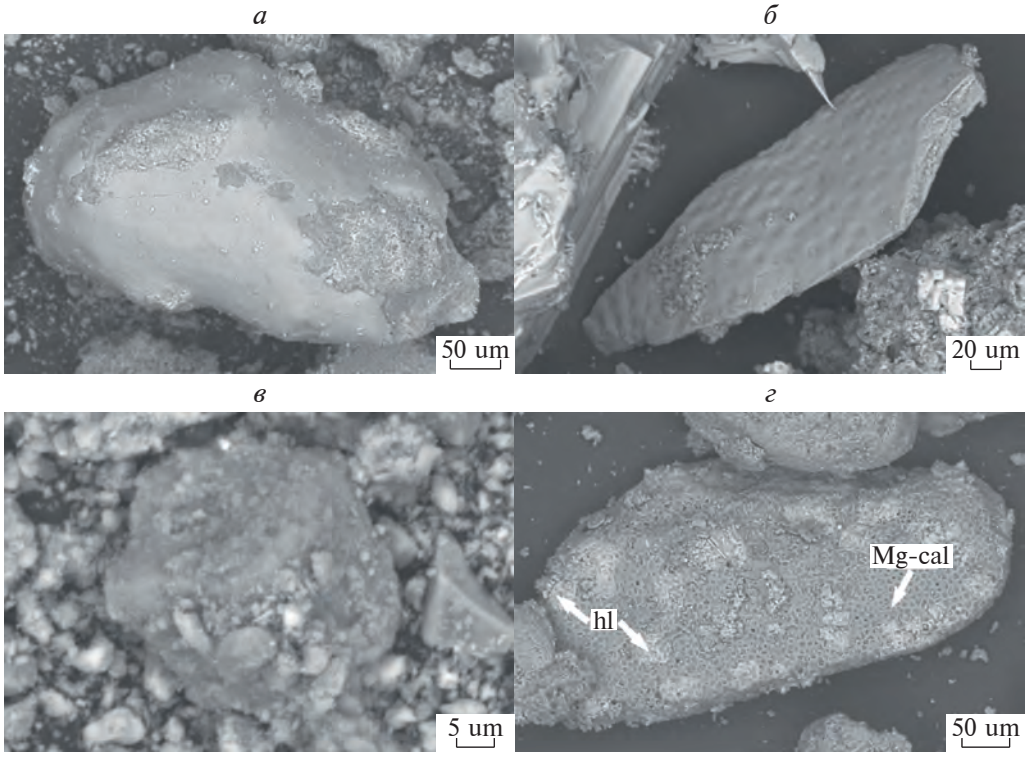


Рис. 11. СЭМ-изображения карбонатных минералов: *а* — кварц, покрытый корочкой карбоната кальция (озеро Сасык-Сиваш), *б* — арагонит (?) (озеро Аджи-Байчи), *в* — доломит (Айгульское озеро), *г* — магнезиальный кальцит (?) (Мойнакское озеро)

Fig. 11. Backscattered electron images of carbonate minerals: *а* — quartz coated with a calcium carbonate crust (Lake Sasyk-Sivash), *б* — aragonite (?) (Lake Adzhi-Baichi), *в* — dolomite (Lake Aigulskoye), *г* — magnesian calcite (?) (Lake Moynakskoye)

карбонатных минералов из различных озер, в том числе обломок раковины из озера Аджи-Байчи и ячеистая микроструктура (колония строматопор (?)) из Мойнакского озера. Что касается доломита, присутствующего, напротив, только в Перекопских озерах, то он, судя по СЭМ-изображению на рис. 11*в*, может представлять собой обломок породы, контактирующей с рассолами.

Дискуссионные вопросы формирования высокомагнезиальных карбонатов в современных водоемах аридной и семиаридной зон подробно рассмотрены в недавней работе (Новоселов, 2023), где приведен обзор литературы, посвященной этой проблеме, а также установлена биогенная природа высокомагнезиальных карбонатов в исследованных автором озерах Зауралья и Ишимской равнины. А. А. Новоселов приводит ссылки на многочисленные литературные данные, свидетельствующие о том, что, несмотря на сильное пересыщение по отношению к доломиту вод многих современных континентальных водоемов, в большинстве случаев образование доломита не происходит. Получены свидетельства связи между образованием доломита и микробиологическими процессами, приводятся различные механизмы участия живых организмов в зависимости от типа метаболизма, однако проблема образования доломита продолжает оставаться до конца не решенной (Pina et al., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплексный анализ химического состава рассолов и минерального состава контактирующих с ними донных осадков выполнен для 13 соляных озер Западного и Северного Крыма. С помощью термодинамического моделирования проведена оценка степени насыщенности относительно эвапоритовых минералов. Показано, что расчетные оценки насыщения рассолов галитом, гипсом и кальцитом дают результаты, в целом согласующиеся с реальной картиной в исследованных озерах. Менее однозначные результаты получены при сопоставлении данных расчета и экспериментально определенного минерального состава в случае высокомагнезиальных карбонатов. Очевидно, на их кристаллизацию, помимо пересыщения, влияет значительно большее число факторов — в том числе, возможно, биотических, которые не могут быть учтены в ходе термодинамического моделирования. Этот вопрос требует дополнительного специального изучения.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-27-00167 “Соляные озера Крыма: геохимическое состояние, особенности минералообразования и моделирование в системе рассол — донные осадки”). При выполнении работ использовалось оборудование научного парка СПбГУ (ресурсный центр “Рентгендифракционные методы исследования”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Берг Л. Г., Борисова Л. А. Изотермы 25 °С растворимости тройных систем Mg^{2+}, Ca^{2+} // CO_3^{2-} — H_2O; Na^+, Ca^{2+} // CO_3^{2-}–H_2O и Na^+, Mg^{2+} // CO_3^{2-}–H_2O // Журн. неорг. хим. **1960**. Т. 5. № 6. С. 1283—1286.

Валяшко М. Г. Закономерности формирования месторождений солей. М.: МГУ, **1962**. 398 с.

Гидроминеральные, лечебные и рекреационные ресурсы Крыма / ред. В. С. Тарасенко, В. И. Васенко. Симферополь: АРИАЛ, **2024**. 380 с.

Гладцин И. Н. Геоморфология СССР. Ч. I. Л.: Учпедгиз, Ленингр. отд., **1939**. 384 с.

Дзенс-Литовский А. И. Пересыпи и лиманы Азово-Черноморского побережья и Степного Крыма // Природа. **1938**. № 6. С. 22—36.

Заморий П. К., Молявко Г. И. Геология и геоморфология Сиваша и Присивашья / Сб. “Комплексн. использ. солян. ресурс. Сиваша и Перекопских озер”. Киев: Изд. АН УССР, **1958**. С. 22—35.

Каюкова Е. П., Чарыкова М. В., Васенко В. И., Ижетникова А. А. Соляные озера Крыма. 1. Современные гидрохимические особенности озер Евпаторийской группы // Водные ресурсы. **2025**. Т. 52. № 3. С. 112—127.

Кузьмина М. А., Франк-Каменецкая О. В., Власов Д. Ю. Влияние на морфологию и растворимость кристаллов гипса ионов-примесей, характерных для поверхности карбонатных пород в городской среде (данные эксперимента) // ЗРМО. **2015**. Т. 144. № 4. С. 26—35.

Курнаков Н. С. Метаморфизация рассолов Крымских соляных озер // Зап. Имп. Санкт-Петербургского минер. общ. Сер. 2. **1896**. Т. 34. № 2. С. 67—68.

Курнаков Н. С., Жемчужный С. Ф. Магниевые озера Перекопской группы // Изв. Росс. акад. наук. **1917**. Т. 11. № 2. С. 137—162.

Курнаков Н. С., Николаев В. И. Солнечное испарение морской воды и озерных рассолов // Изв. ИФХА АН СССР. **1938**. Т. 10. С. 333—366.

Курнаков Н. С., Кузнецов В. Г., Дзенс-Литовский А. И., Равич М. И. Соляные озера Крыма. М.-Л.: АН СССР, **1936**. 278 с.

Методы анализа рассолов и солей / ред. Ю. В. Морачевского и Е. М. Петровой. М., Л.: Химия, **1965**. 403 с.

Мушкетов И. В. Заметка о происхождении крымских соляных озер // Горный журнал, **1895**. Т. 2. С. 344—392.

Новоселов А. А. Геохимия вод и особенности современного минералообразования в бессточных озерах лесостепной зоны Зауралья и Ишимской равнины. Дисс. ... канд. геогр. наук. Томск. **2023**. 126 с.

Понизовский А. М. Соляные ресурсы Крыма. Симферополь: Крым, **1965**. 263 с.

Попов Ю. В., Гулов О. А, Васенко В. И. О строении и составе толщи илов Сакского озера (Крым) // Отечественная геология. **2015**. № 3. С. 45—52.

Сонненфелд П. Рассолы и эвапориты: пер. с англ. М.: Мир, **1988**. 480 с.

Справочник по растворимости солевых систем / ред. А. Д. Пельша. В 2 т. Л.: Химия, **1975**. Т. 1, 1070 с.; т. 2, 1063 с.

Чарыкова М. В., Каюкова Е. П., Васенко В. И., Бессонова А. М., Решетникова О. Е. Термодинамический анализ условий минералообразования в соляных озерах Крыма (на примере озер Евпаторийской группы) // ЗРМО. **2025**. Т. 154. № 3. С. 3—17.

Features of Modern Mineral Formation in Salt Lakes of Western and Northern Crimea

A. M. Bessonova[1], M. V. Charykova[1*], E. P. Kayukova[1], V. V. Chaban[2], A. A. Turchenko[2], N. V. Platonova[1], E. S. Sukharzhevskaya[1]

[1] Saint-Petersburg State University, Saint-Peterburg, Russia

[2] Crimean Hydrogeological Operating Station, Saki, Russia

** e-mail: m-char@yandex.ru*

Abstract. In June 2025, samples of surface waters (brines) and the upper layer of bottom sediments in contact with them were collected from 13 saline lakes in Western and Northern Crimea. The chemical composition of the brines was determined, their hydrochemical type (sulfate or chloride) was identified, and saturation indices for the main evaporite minerals were calculated. Mineral compositions of the bottom sediments were characterized using X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The experimental data generally confirm the modeling results for minerals such as halite, gypsum, and calcite. In addition to brine supersaturation, a wider range of factors appears to influence the crystallization of high-magnesian carbonates, including biotic factors, which cannot be accounted for in

thermodynamic modeling and therefore require further investigation. The main differences between the lakes of the two groups are demonstrated — compared to the Yevpatoria Lakes, the brines of the Perekop Lakes are enriched in magnesium salts and chlorides, while the bottom sediments of the Perekop Lakes differ from the Yevpatoria Lakes by the presence of dolomite and the absence of aragonite.

Keywords: saline lakes, Crimea, Yevpatoria group, Perekop group, saturation index, gypsum, halite, calcite, aragonite, dolomite

REFERENCES

Berg L. G., Borisova L. A. Solubility isotherms of 25 °C of ternary systems Mg^{2+}, Ca^{2+} // CO_3^{2-}–H_2O; Na^+, Ca^{2+} // CO_3^{2-}–H_2O; and Na^+, Mg^{2+} // CO_3^{2-}–H_2O. *Russian J. Inorganic Chem*. **1960**. Vol. 5. N 6. P. 1283—1286 (*in Russian*).

Charykova M. V., Kayukova E. P., Vasenko V. I., Bessonova A. M., Reshetnikova O. E. Thermodynamic analysis of mineral formation conditions in Crimean salt lakes (using the example of the lakes of the Yevpatoria group). *Zapiski RMO* (*Proc. Russian Miner. Soc.*). **2025**. N 3. P. 3—15 (*in Russian*).

Charykova M. V., Kayukova E. P., Vasenko V. I., Izhetnikova A. A., Bessonova A. M., Reshetnikova O. E. Salt Lakes of Crimea 2. Modern Hydrochemical Features of the Lakes of the Perekop Group. *Water Resources*. **2025**. Vol. 52. N 6. P. 1268—1282.

Deocampo D. M., Jones B. F. Geochemistry of saline lakes. In: *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier Pergamon, **2014**. Vol. 7. P. 437—469.

Dzens-Litovsky A. I. Spits and estuaries of the Azov-Black Sea coast and the Steppe Crimea. *Priroda*. **1938**. N 6. P. 22—36 (*in Russian*).

Gladtsin I. N. Geomorphology of the USSR. Part I. Leningrad: Uchpedgiz, **1939**. 384 p. (*in Russian*).

Handbook of solubility of salt systems. *Ed. by A. D. Pelsh*. In 2 vol. Leningrad: Chemistry, **1975**. Vol. 1. 1070 p., vol. 2. 1063 p. (*in Russian*).

Hydromineral, medical and recreational resources of Crimea. Ed. by S. V. Tarasenko, V. I. Vasenko. Simferopol: ARIAL, **2024**. 380 p. (*in Russian*).

Jones B. F., Naftz D. L., Spencer R. J., Oviatt C. G. Geochemical evolution of Great Salt Lake, Utah, USA. *Aquatic Geochemistry*. **2009**. Vol. 15. N 1. P. 95—121.

Kayukova E. P., Charykova M. V., Vasenko V. I., Izhetnikova A. A. Salt lakes of Crimea 1. Modern hydrochemical features of the lakes of the Yevpatoria group. *Water Resources*. **2025**. Vol. 52. N 3. P. 528—541 (*in Russian*).

Kurnakov N. S. Metamorphization of brines of the Crimean salt lakes. *Zap. Imper. St. Petersb. mineral. obshch*. Ser. 2. **1896**. Vol. 34. N 2. P. 67—68 (*in Russian*).

Kurnakov N. S., Kuznetsov V. G., Dzens-Litovsky A. I., Ravich M. I. Salt Lakes of the Crimea. Moscow: USSR Acad. Sci., **1936**. 278 p. (*in Russian*).

Kurnakov N. S., Nikolaev V. I. Solar evaporation of seawater and lake brines. *Proc. In-ta phys.-chem. Anal. USSR Acad. Sci*. **1938**. Vol. 10. P. 333—366 (*in Russian*).

Kurnakov N. S., Zhemchuzhnyi S. F. Magnesium lakes of the Perekop group. *Proc. Russ. Akad. Sci.* **1917**. Vol. 11. N 2. P. 137—162 (*in Russian*).

Kuzmina M. A., Frank-Kamenetskaya O. V., Vlasov D. Yu. Influence of ions-admixtures, typical for the carbonate rocks surface in the urban environment, upon morphology and solubility of gypsum crystals (experimental data). *Zapiski RMO* (*Proc. Russian Miner. Soc.*). **2015**. Vol. 144. N 4. P. 26—35 (*in Russian*).

Methods of brine and salt analysis. Ed. by Yu. V. Morachevsky, E. M. Petrova Moscow-Leningrad: Chemistry, **1965**. 403 c. (*in Russian*).

Muller G., Irion G., Forstner U. Formation and diagenesis of inorganic Ca–Mg carbonates in the lacustrine environment. *Naturwissenschafte*n. **1972**. Vol. 59. P. 158—164.

Mushketov I. V. Note on the origin of the Crimean salt lakes. *Mining J.* **1895**. Vol. 2. P. 344—392 (*in Russian*).

Novoselov A. A. Geochemistry of waters and features of modern mineral formation in drainless lakes of the forest-steppe zone of the Trans-Urals and the Ishim plain. *PhD thesis*. Tomsk, **2023**. 126 p. (*in Russian*).

Pina C. M., Pimentel C., Crespo A. The Dolomite problem: A Matter of time. *ACS Earth and Space Chemistry*. **2022**. Vol. 6. N 6. P. 1468—1471.

Ponizovsky A. M. Salt resources of the Crimea. Simferopol: Crimea, **1965**. 263 p. (*in Russian*).

Popov Yu. V., Gulov O. A., Vlasenko V. I. On the structure and composition of the silt thick of the Saki Lake (Crimea). *Native Geol*. **2015**. N 3. P. 45—52 (*in Russian*).

Sonnenfeld P. Brines and evaporites. Academic Pr., **1985**. 614 p.

Valyashko M. G. Patterns of formation of salt deposits. Moscow: MGU, **1962**. 398 p. (*in Russian*).

Zamoriy P. K., Molyavko G. I. Geology and geomorphology of Sivash and Prisivashye. In: *Integrated Use of Salt Resources of Sivash and Perekop Lakes*. Kiev: Izd. AN UkrSSR, **1958**. P. 22—35 (*in Russian*).