

УДК 556.55; 553.776

СОЛЯНЫЕ ОЗЕРА КРЫМА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЗЕР ЕВПАТОРИЙСКОЙ ГРУППЫ

© 2025 г. Е. П. Каюкова^а*, М. В. Чарыкова^а, В. И. Васенко^б, А. А. Ижетникова^б

^аСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^бГосударственное унитарное научно-производственное предприятие Республики Крым
“Крымская гидрогеологическая режимно-эксплуатационная станция”,
Саки, 296500 Россия

*e-mail: epkayu@gmail.com

Поступила в редакцию 26.02.2024 г.

После доработки 18.04.2024 г.

Принята к публикации 05.12.2024 г.

Приведены данные о химическом составе вод 12 соляных озер Крымского п-ова, относящихся к Евпаторийской группе. Представлена краткая характеристика геоморфологических и геолого-гидрогеологических особенностей этих озер. С помощью метода физико-химического моделирования рассчитаны индексы насыщенности вод по карбонатам кальция и магния, гипсу, галиту. Аналогичный расчет выполнен также для данных 1965 г., что позволило проследить изменения в степени насыщенности озерных вод за 50-летний период. Влияние деятельности человека оказало значительное воздействие (в отличие от климатических колебаний) на экосистемы соляных озер Крыма. Особенно это проявилось в трансформации химического состава оз. Кызыл-Яр и в меньшей степени оз. Богайлы.

Ключевые слова: соляные озера Крыма, Евпаторийская группа, насыщенность, гипс, галит, карбонаты кальция и магния, рапа соляных озер.

DOI: 10.31857/S0321059625030092 EDN: SYKVL1

ВВЕДЕНИЕ

Первые сведения о соляных озерах Крыма (описательного характера) оставил академик П.С. Паллас по результатам экспедиции, организованной Петербургской академией наук в 1781–1782 гг. Он же одним из первых (в 1795 г.) дал объяснение образованию крымских соляных озер и садовой соли [20].

Комплексное геологическое и гидрохимическое изучение минеральных озер степного Крыма начинается в 1882 г. с работ Л. Першке [21]. Он предложил первую классификацию озер на основе химического анализа рапы, а также объяснил изменение ее состава просачиванием морской воды через пересыпи и привносом притекающими водами соляных частиц из окружающей озера солонцеватой степи. В 1895 г. на основе имеющихся на тот период сведений И.В. Мушкетовым была подготовлена публикация о происхождении различных типов соляных озер [17]. Так, выделяя по происхождению лиманные или

плотинные озера, он отмечал, что наличие большого количества озер в регионе обусловлено, кроме климата, колебаниями уровня Черного и Каспийского морей.

Большой вклад в понимание процессов, происходящих в рапе соляных озер Крыма и вызывающих изменение состава солей, внесен Н.С. Курнаковым и его сотрудниками (С.Ф. Жемчужным, В.И. Николаевым, В.П. Ильинским и др.), в работах которых развивалось физико-химическое направление исследований, а сами озера рассматривались как равновесные водно-солевые системы. На этой основе Н.С. Курнаковым была предложена классификация рассолов, которая впоследствии была развита и доработана М.Г. Валяшко [2]. В 1930–1933 гг. на Евпаторийском побережье под руководством Н.С. Курнакова работала Крымская физико-химическая экспедиция Академии наук СССР. Параллельно исследования проводила комплексная гидрогеологическая экспедиция ЦНИГРИ (ныне Институт Карпинского) под непосредственным

руководством А.И. Дзенс-Литовского. Итогом исследований 1930-х гг. стала монография Н.С. Курнакова и соавторов “Соляные озера Крыма” [14], изданная в 1936 г. В 1940–1960-е гг. исследованием Сиваша и соляных озер Крыма занимались также Крымская лаборатория Государственного института прикладной химии (ГИПХ), Крымское геологическое отделение и Крымский филиал АН СССР, Институт минеральных ресурсов АН УССР, Крымский филиал Государственного научно-исследовательского института строительных материалов и изделий. Результаты этих работ обобщены в монографии А.М. Понизовского “Соляные ресурсы Крыма” [23].

В более поздний период фундаментальных исследований гидроминеральных ресурсов полуострова, равных по масштабу работам середины XX в., не проводилось. Особенно резкое сокращение исследований произошло в 1980-е гг. – практически до полной стагнации. Работы по систематическому изучению соляных озер Крыма были возобновлены сотрудниками Сакской ГГРЭС (с 2014 г. ГУНПП РК “Крымская ГГРЭС”) в содружестве с такими организациями, как ГУП РК “Крымгеология”, Крымская Академия наук, Таврическая академия ФГАОУ ВО “Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского”, ГБУЗ РК “АНИИ им. И.М. Сеченова”, Санкт-Петербургский государственный университет и др. [3, 10, 13, 18]. При этом, если в XX в. соляные озера рассматривались в первую очередь как источники гидроминерального сырья, в настоящее время не меньшее внимание уделяется оценке их бальнеологического ресурса.

В 1926 г. (на основании решения Главного курортного управления РСФСР) при Сакском госкурорте была создана постоянная наблюдательная станция, первым заведующим которой был П.Т. Иванов. Первоначально исследования носили единичный характер и касались только Сакского озера, в дальнейшем работы приняли мониторинговый характер и распространились на все озера Крымского п-ва. В разные исторические периоды объем работ был неравномерный, что в первую очередь было связано с материальными возможностями. Но именно благодаря работам сотрудников Сакской ГРЭС (Крымская

ГГРЭС) накоплен достаточно большой фактический материал, составляющий основной банк данных по режиму и составу водной среды и донных отложений крымских озер. На основании этих данных предполагается серия работ с целью обобщения гидрохимических особенностей 30 соляных озер Крыма, принадлежащих к Евпаторийской, Керченской, Перекопской и Тарханкутской группам, а также их анализа с применением метода физико-химического моделирования. Первая работа посвящена озерам Евпаторийской группы, которые расположены в западной части Равнинного Крыма на берегу Каламитского залива Черного моря. В Евпаторийскую группу входят 15 соляных водоемов, в том числе самое большое в Крыму оз. Сасык-Сиваш.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно физико-географическому районированию Крыма [19], Евпаторийская группа соляных озер приурочена к прибрежным зонам двух физико-географических районов – Евпаторийского предгорно-равнинного и Тарханкутского платообразно-увалистого. В Евпаторийском районе располагаются озера Сасык-Сиваш, Сакское, Кызыл Яр и Богайлы, остальные – в Тарханкутском районе (рис. 1).

КЛИМАТ

Климатические условия Евпаторийского побережья отличаются большой сухостью в летне-осенний период, высокой температурой воздуха и большим количеством солнечных дней. Все это создает благоприятные условия для добычи на солепромыслах солнечной соли бассейновым способом и для развития курортного дела.

По данным метеостанции г. Евпатории (10 м над у. м.), средние значения температуры приземного воздуха и средние количества атмосферных осадков за последние 50 лет несколько изменились [22]. К сожалению, данные по осадкам неполные, тем не менее заметно, что среднегодовые значения температуры увеличились на 1.4°C, при этом возросло количество атмосферных осадков в среднем на 19.5 мм (табл. 1, рис. 2).



Рис. 1. Евпаторийская группа соляных озер Крыма: 1 – Ойбургское, 2 – Аджиджи-Байчи, 3 – Аирчи, 4 – Галгасское, 5 – Круглое, 6 – Конрадское (Соленое), 7 – Терекли, 8 – Большое Ялы-Мойнакское, 9 – Малое Ялы-Мойнакское, 10 – Малое Отар-Мойнакское, 11 – Мойнакское, 12 – Сасык-Сиваш (Сасык), 13 – Сакское, 14 – Кызыл-Яр (Кизил-Яр, Камышлы), 15 – Богайлы (Кунтуган).

Таблица 1. Метеоданные по данным метеостанции г. Евпатории

Средние годовые метеоданные	Период 1950–1965 гг.			Период 2002–2017 гг.		
	среднее	минимум	максимум	среднее	минимум	максимум
Температура, °С	11.4	9.8	12.4	12.8	11.6	13.7
Осадки, мм	366.9	245	569	386.5	253	626

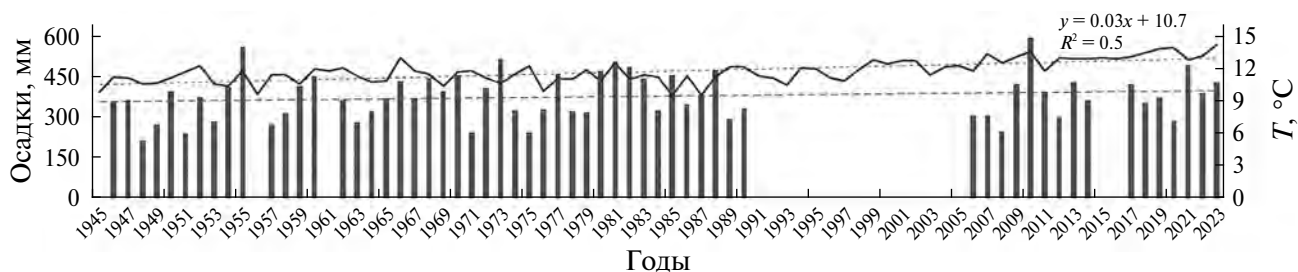


Рис. 2. Ход годовой температуры приземного воздуха и количества атмосферных осадков по данным метеостанции (номер 33929) г. Евпатории.

Что касается испаряемости (максимально возможного испарения), то, по данным справочного издания 1959 г. [1], среднемноголетняя величина испаряемости на изучаемой территории в два раза превышает среднемноголетнее количество осадков. Согласно более поздним исследованиям [12], она варьирует в пределах 850–900 мм.

ГЕОМОРФОЛОГИЯ

Изучаемая территория располагается в приморской зоне Каламитского залива в геоморфологической провинции Равнинного Крыма. Низменная равнина осложнена неглубокими долинами небольших рек и балками с пологими склонами (крутизной 4°–8°), которые заканчиваются акваториями соляных озер, отделенных от моря песчано-галечными пересыпями шириной от 100 до 600 м (2–3 м над у. м.).

Геологическая история территории тесно связана с геологической историей четвертичного периода Черного моря. Морфометрический облик озер не одинаков. Длинная ось озер прибрежной зоны Евпаторийского района перпендикулярна линии морского берега, Тарханкутского района – параллельна ему.

Современные геологические процессы морского побережья оказывают большое влияние на пересыпи озер, которые сложены мелкозернистыми песками и иногда гальками из обломков органических известняков (ракушечника) и песчаников.

А.И. Дзенс-Литовский 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” [9].

После отшнуровывания заливов от моря озера подверглись усыханию, что увеличило концентрацию озерной рапы, при этом понизился уровень воды в озерах относительно мирового океана. Некоторые озера в летний период полностью пересыхают, покрываясь слоем соли, а в осенне-зимне-весенний период вновь покрываются слоем до 5–10 см рапы.

Черное море в четвертичный период прошло через ряд изменений химического состава за счет череды опреснений и осолонений (связанных с колебаниями климата), что отражалось и на химическом составе рапы прибрежных озер.

ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

По В.В. Юдину [33], современный Равнинный Крым в структурном плане понимается как южная часть Восточноевропейского кртона с фундаментом из активно-окраинных комплексов Скифской палеоплиты. Мощность его мел-кайнозойского чехла в Каркинитском прогибе достигает 5 км. Локальные структуры Равнинного Крыма (преимущественно надвиги и принадвиговые складки) – это отдельные пологие антиклинали в мезозойско-кайнозойских отложениях, образованные вдоль субширотных ретронадвигов преимущественно южного наклона. На юге Равнинный Крым граничит с Крымско-Кавказской складчато-надвиговой областью. На рис. 3 представлена геологическая схема побережья Каламитского залива Евпаторийского района, на которой В.В. Юдиным [34], на основании изучения клифа южнее оз. Кызыл-Яр, был выделен Кызыл-ярский надвиг южного падения. Этот надвиг непосредственно влияет на формирование водного режима оз. Кызыл-Яр.

Фундамент платформы сложен сильно дислоцированными метаморфизованными палеозойскими породами. Осадочные породы чехла, имеющие преимущественно морской генезис, включают породы от мезозоя до кайнозоя. Несмотря на то, что палеозойские породы нигде



Рис. 3. Геологическая схема побережья Каламитского залива [29].

не выходят на дневную поверхность, доказано их широкое развитие в основании разреза всего рассматриваемого региона [11].

На рис. 4 представлена гидрогеологическая схема изучаемой территории [29], по которой мы можем судить о разнообразии осадочных отложений в различных водоносных горизонтах и комплексах, а также об их стратиграфической принадлежности.

Подземные воды играют значительную роль в формировании химического состава рапы большинства озер Евпаторийской группы, а также существенно влияют на их режим. Часто близ озер наблюдаются тростниковые заросли и заболоченные участки, что косвенно доказывает наличие разгрузки подземных вод. На дне некоторых озер могут функционировать источники.

Направление движения подземных вод показано на рис. 4. Можно видеть, что в питании озер Тарханкутского района большую роль играют подземные воды, сформированные в средне-верхне-сармат-мэотис-понтических отложениях, сложенных главным образом известняками, песчаниками и конгломератами. Их химический состав преимущественно хлоридный (минерализация варьирует в пределах 1.5–3.0 г/л) [5]. В питании озер Евпаторийского района участвуют пресные (реже солоно-

ватые) подземные воды, преимущественно гидрокарбонатные [5], формирующиеся в карбонатных породах неогена и палеогена и имеющие область питания в предгорьях Крымских гор.

Альминская впадина в западном направлении расширяется и углубляется в сторону моря. Ее юго-восточным крылом являются моноклиналильные предгорные гряды, где обнажается весь комплекс пород, выполняющих синеклизу, — мел, палеоген и неоген. Породы падают на северо-запад под углом $\leq 6^\circ$. Мощность меловых и палеогеновых отложений на северном крыле синеклизы меньше, чем на южном [5]. Большая часть Альминской впадины лежит под водами Евпаторийского залива.

Вдоль морского побережья тянется полоса современных морских отложений, образующих пляжи. Против устьевых частей затопленных балок пляжи сливаются с пересыпями, отделяющими от моря соляные озера. Эти отложения в южной части площади в основном представлены галечниками, а на севере — песками, состоящими из мелких обломков, образовавшихся за счет разрушения мэотических оолитовых известняков, слагающих берег. Выше лежащие слои, отвечающие осадкам уже отшнурованных от моря озер, не содержат остатков морских организмов, кроме тех, которые попали в озера при прорывах

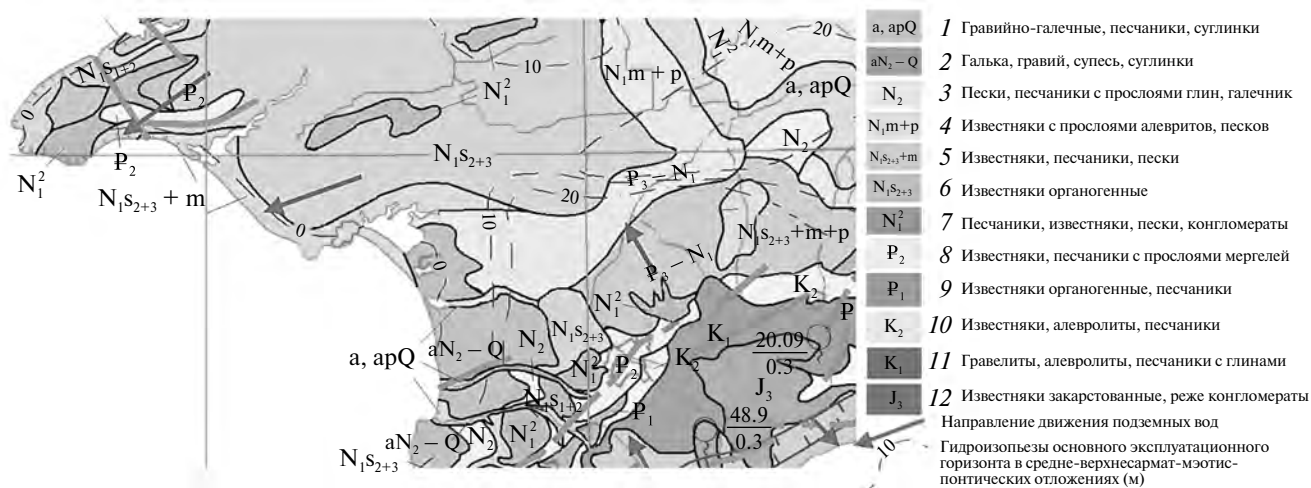


Рис. 4. Гидрогеологическая схема по материалам [29]. 1 – Четвертичный ВГ (a,apQ); 2 – Плиоцен – четвертичный ВГ (aN₂-Q); 3 – Плиоценовый ВГ (N₂); 4 – Мэотис-понтический ВГ (N₁m+p); 5 – Средне-верхнесарматско-мэотический ВГ (N₁S₂₊₃+m); 6 – Средне-верхнесарматский ВГ (N₁S₂₊₃); 7 – Среднемиоценовый ВГ (N₁²); 8 – Эоценовый ВГ (P₂); 9 – Палеоценовый ВГ (P₁); 10 – Верхнемеловой ВГ (K₂); 11 – Нижнемеловой ВГ (K₁); 12 – Верхнеюрский ВГ (J₃).

через песчано-галечную пересыпь морской воды при штормах. Нижние слои озерных отложений соответствуют новоэвксинским слоям Черного моря, средние — древнечерноморским, а верхние, состоящие из различных озерных илов, прослоев и линз донной соли и гипса, являются современными образованиями.

Лиманно-морские и лиманные осадки слагают днища соляных озер и представлены черными, темно-серыми илами, нередко глинистыми, неравномерно обогащенными ракушечным, песчаным и растительным материалом. Мощность колеблется от 0.5 до ≥ 10 м [14].

Почти во всех водоемах обнаружены крупные залежи черных, темно-серых и серых илов мощностью до 12–17 м. Под рапой обычно расположена гипсовая и известняковая корка толщиной 0.5–2.5 см, под которой находится черный ил мощностью до 2.5 м (Сакское озеро). Ниже залегают серые илы. В Сакском озере в толще илов обнаружена линза погребенной поваренной соли, мощностью > 3.5 м. Источниками питания озер являются морские воды, поступающие путем инфильтрации через пересыпи (они составляют 3–8% общего притока вод). Подземные воды и воды поверхностного стока дают 46–60% общего баланса вод и осадки — 35–45% [23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными данными для гидрохимической характеристики соляных озер послужили результаты химико-аналитических работ, выполненных в Центральной испытательной лаборатории Крымской гидрогеологической режимно-эксплуатационной станции (г. Саки). Наиболее полное опробование (12 озер Евпаторийской группы) проводилось в 2016 г., но для ряда озер (например, Сакское, Мойнакское) накоплены систематические данные за период с начала 2000-х гг. Ионы кальция, магния, хлорид-, карбонат- и гидрокарбонат-ионы определяли объемным (титриметрическим) методом согласно ГОСТ 23268.3-78 [7]. Сухой остаток и сульфат-ион определяли гравиметрическим методом (ГОСТ 26449.1-85 [8]). Сумму $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ находили расчетным путем по разнице суммы концентраций анионов (мг-экв/л) и жесткости. рН изме-

ряли по ГОСТ 26449.1-85 [8] с использованием иономера “И-160 МИ”.

Для сравнительной характеристики соляных озер Евпаторийской группы применялся расчет коэффициентов метаморфизации, предложенных М.Г. Валяшко, а также физико-химическое моделирование — оценка степени насыщенности рассолов относительно хлоридов, сульфатов и карбонатов натрия, калия, магния и кальция. Моделирование выполнялось с помощью программного комплекса Geochemist's Workbench (GWB 9) с подключением базы исходных термодинамических данных “thermohmw”, которая использует для расчета коэффициентов активности компонентов раствора уравнения Питцера. Основные принципы и алгоритм такого моделирования, отличительной чертой которого является расчет избыточных термодинамических функций компонентов концентрированных растворов, изложены в многочисленных работах, например [4, 32, 36–42]. Примеры применения физико-химического моделирования для характеристики ряда бассейнов современной эвапоритовой седиментации (заливы Сиваш, Кара-Богаз-Гол, озера Кучук, Танатар) можно найти и в предыдущих работах авторов настоящей статьи [30–32].

По сравнению с традиционным построением диаграмм растворимости используемый метод компьютерного физико-химического моделирования обладает рядом преимуществ. Прежде всего, он дает возможность рассчитывать диаграммы растворимости при любой температуре из исследованного диапазона, в то время как литературные данные существуют лишь для отдельных значений температуры, причем зачастую они носят фрагментарный характер и не дают возможности построить диаграмму полностью. Кроме того, отметим, что диаграммы растворимости систем с числом компонентов > 4 имеют мерность ≥ 3 ; в связи с этим их изображение на плоскости требует ряда упрощений, что крайне затрудняет или делает вообще невозможными графические построения и расчеты с использованием этих диаграмм. Компьютерные методы моделирования не имеют подобных ограничений числа компонентов и позволяют выбирать в качестве модельных водно-солевые системы, которые по своему составу наилучшим образом

соответствуют реальным природным или технологическим рассолам. В рассматриваемом случае это система Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} // Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} – H_2O . База данных “thermohmw” содержит параметры уравнений Питцера и термодинамические потенциалы твердых фаз, найденных авторами работ [36, 38–40].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты химического анализа озерных вод Евпаторийской группы представлены в табл. 2 и на рис. 5. Приведены 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.

Н.С. Курнаковым в [15] введено понятие метаморфизации рассолов как процесса потери

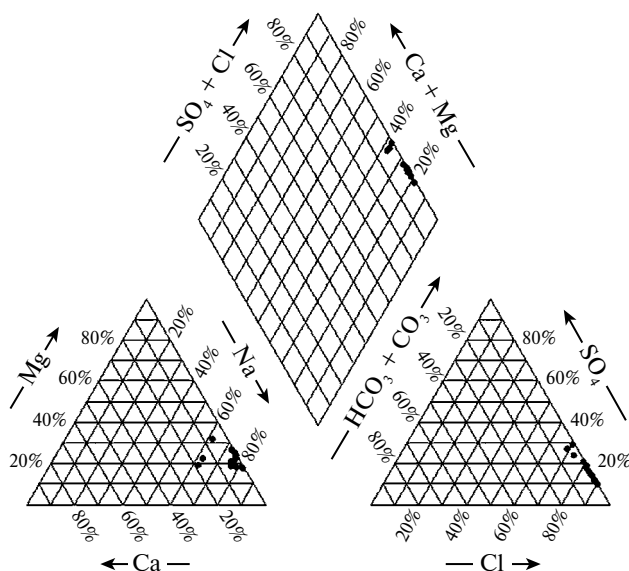


Рис. 5. Химический состав озерных вод Евпаторийской группы на диаграмме Пайпера (август–октябрь 2016 г.).

Таблица 2. Химический состав озерных вод Евпаторийской группы

Озеро	№ на рис. 1	Дата отбора	Na^+K^+ , г/л	Mg^{2+} , г/л	Ca^{2+} , г/л	Cl^- , г/л	SO_4^{2-} , г/л	HCO_3^- , г/л	CO_3^{2-} , г/л	pH	Сухой остаток, г/л	K_1	K_2	K_3	K_4
Ойбургское	1	04.10.2016	39.29	4.67	1.32	67.65	11.73	0.19	—	7.67	126.2	0.01	0.55	3.7	0.05
Аджи–Байчи	2	04.10.2016	58.87	9.0	0.7	99.0	25.47	0.42	—	7.72	194.0	0.01	0.69	15	0.20
Аирчи	3	04.10.2016	106.58	17.66	0.35	185.75	40.34	0.93	—	7.61	356.8	0.01	0.58	49	0.87
Галгасское	4	05.10.2016	101.68	19.43	0.45	175.81	50.45	1.34	—	7.66	349.0	0.01	0.66	48	0.98
Конрадское	6	06.10.2016	71.73	11.46	0.55	127.65	22.83	0.44	—	7.74	229.6	0.01	0.50	18	0.26
Терекли	7	07.10.2016	103.96	11.65	0.44	166.64	37.75	0.79	—	7.78	323.6	0.01	0.82	36	0.59
Большое Ялы–Мойнакское	8	04.10.2016	27.40	3.99	1.24	45.48	14.08	0.1	0.08	8.64	92.0	0.01	0.76	4.8	0.07
Мойнакское	11	04.10.2016	16.44	2.1	0.9	26.08	9.15	0.31	—	7.97	56.65	0.02	0.90	4.4	0.11
Сасык–Сиваш (соленая часть)	12	03.10.2016	102.32	17.81	0.3	189.57	27.17	0.38	—	7.40	340.4	0.004	0.39	38	0.42
Сасык–Сиваш (пресная часть)	12	03.10.2016	1.68	0.31	0.35	3.04	1.34	0.18	—	8.20	7.06	0.07	0.71	1.8	0.17
Сакское, Вост. бассейна	13	16.08.2016	57.97	8.68	0.92	103.76	18.99	0.3	—	7.90	190.0	0.01	0.53	8.7	0.11
Кызыл–Яр	14	04.10.2016	1.0	0.16	0.25	1.7	0.89	0.16	—	7.95	4.18	0.10	0.83	1.7	0.21
Богайлы	15	03.10.2016	12.14	3.21	1.02	21.02	11.81	0.26	—	8.20	50.4	0.01	0.79	4.9	0.08

рассолом морского происхождения иона SO_4^{2-} в результате “соприкосновения с углекислыми соединениями кальция материковых отложений”, а также “коэффициента метаморфизации”, представляющего собой соотношение концентраций сульфата и хлорида магния. Позднее им были предложены два класса рассолов: первый и второй [16]. Первый характеризовал состав озер морского происхождения, второй – предельный случай их метаморфизации, когда в растворе исчезает сульфат-ион и начинает накапливаться хлорид кальция. Согласно этой классификации, озера Евпаторийской группы относятся к первому классу – коэффициент метаморфизации вод > 1 . Реже встречаются хлоркальциевые воды – они представлены, главным образом, в оз. Кызыл-Яр, рапа которого метаморфизована до рассолов второго класса [23].

Развивая представления Н.С. Курнакова и исходя из данных о совместной растворимости солей, М.Г. Валяшко выделил три основных химических типа рассолов соляных озер: карбонатный, сульфатный и хлоридный [2]. При разработке классификации им была поставлена задача выбрать для каждого типа водно-солевую систему, причем максимально простую, содержащую не более четырех солевых компонентов (для удобства ее изображения и изучения), с целью возможности анализа процессов кристаллизации солей в самосадочных озерах на основе диаграммы растворимости этой системы. Процессы кристаллизации солей в водоемах содового типа могут, согласно [2], моделироваться с помощью системы $\text{Na}^+ (\text{K}^+) // \text{Cl}^-$, SO_4^{2-} , CO_3^{2-} (HCO_3^-) – H_2O . Поскольку такая система содержит более четырех солевых компонентов, скобками отмечены те из них, которыми можно пренебречь при построении модельной диаграммы растворимости, поскольку без их учета могут быть установлены основные направления развития самосадочного бассейна. В качестве физико-химической модели рассолов сульфатного типа была выбрана система $\text{Na}^+ (\text{K}^+)$, $\text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^-$, SO_4^{2-} – H_2O . Здесь выделяются два подтипа: сульфатно-натриевый и сульфатно-магниевый. Процессы кристаллизации солей в бассейнах хлоридного типа могут моделироваться с помощью системы $\text{Na}^+ (\text{K}^+)$, Mg^{2+} , $\text{Ca}^{2+} // \text{Cl}^-$ – H_2O .

Вместо коэффициентов метаморфизации, рассчитываемых из концентраций солей (масс. %), М.Г. Валяшко предложены 4 коэффициента

$$K_1 = \frac{\Theta_{\text{CO}_3^{2-}} + \Theta_{\text{HCO}_3^-}}{\Theta_{\text{Ca}^{2+}} + \Theta_{\text{Mg}^{2+}}},$$

$$K_2 = \frac{\Theta_{\text{CO}_3^{2-}} + \Theta_{\text{HCO}_3^-} + \Theta_{\text{SO}_4^{2-}}}{\Theta_{\text{Ca}^{2+}} + \Theta_{\text{Mg}^{2+}}},$$

$$K_3 = \frac{\Theta_{\text{CO}_3^{2-}} + \Theta_{\text{HCO}_3^-} + \Theta_{\text{SO}_4^{2-}}}{\Theta_{\text{Ca}^{2+}}},$$

$$K_4 = \frac{\Theta_{\text{CO}_3^{2-}} + \Theta_{\text{HCO}_3^-}}{\Theta_{\text{Ca}^{2+}}},$$

Θ_i – число г-экв i -го иона.

Характерные признаки принадлежности воды к одному из главных химических типов [2] представлены в табл. 3.

Согласно классификации Курнакова–Валяшко, озера Евпаторийской группы относятся к сульфатному типу, сульфатно-магниевому подтипу. Соответствующие коэффициенты метаморфизации представлены в табл. 2. Коэффициент K_1 в большинстве случаев составляет 0.01–0.02, за исключением оз. Кызыл-Яр и пресной части оз. Сасык-Сиваш. Эти озера отличает наименьшая минерализация воды (< 10 г/л). Коэффициент K_2 принимает значения от 0.39 до 0.90. Коэффициент K_3 имеет значительно больший разброс – от 1.7 до 49. Наименьшие значения (1.7 и 1.8) характерны все для тех же наименее соленых вод оз. Кызыл-Яр и пресной части оз. Сасык-Сиваш. Эти значения близки к 1, что приближает воды к хлоридному типу. Заметим, что в отношении

Таблица 3. Характерные признаки принадлежности воды к одному из главных химических типов [2]

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

оз. Кызыл-Яр о том же писал А.М. Понизовский в 1965 г. [23]. Это объясняется естественными причинами, а именно – расположением оз. Кызыл-Яр в широкой зоне дислокаций регионально-го Кызыл-Ярского надвига [34]. Здесь происходит активная разгрузка пресных гидрокарбонатных вод, область питания которых находится в предгорьях Крымских гор, и вод, фильтрующихся из Межгорного водохранилища.

Наибольшие значения коэффициента K_3 (36–49) характерны для вод с максимальной минерализацией – озер Аирчи, Галгасского, Терекли, соленой части оз. Сасык-Сиваш. Обращают на себя внимание значения коэффициента K_4 в двух из этих озер – Аирчи и Галгасском. Они очень близки к 1.

На рис. 6 представлена диаграмма растворимости четырехкомпонентной взаимной системы Na^+ , Mg^{2+} // Cl^- , SO_4^{2-} – H_2O при 25°C , с помощью которой обычно наглядно изображают состав рассолов сульфатного типа и моделируют протекающие в них процессы седиментации. На диаграмму нанесены фигуративные точки вод озер Евпаторийской группы. Видно, что они лежат в основном в поле кристаллизации галита. Лишь фигуративные точки воды оз. Кызыл-Яр, пресной части оз. Сасык-Сиваш и оз. Богайлы

расположены отдельно и попадают на стабильной диаграмме в поле кристаллизации бледита – двойного сульфата натрия и магния. Однако, как известно из [2], в природных условиях часто реализуется метастабильное равновесие, при котором бледит не образуется – эти равновесия показаны на рис. 6 пунктирными линиями. В случае метастабильных равновесий фигуративные точки вод всех озер Евпаторийской группы лежат в поле кристаллизации галита. Это означает, что при их испарении первая хорошо растворимая соль, выпадающая в осадок, – галит.

Как уже сказано, графическое изображение диаграмм фазовых равновесий ограничивает число компонентов системы, являющейся физико-химической моделью рассолов. В частности, система Na^+ , Mg^{2+} // Cl^- , SO_4^{2-} – H_2O не учитывает присутствие ионов Ca^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , и, таким образом, невозможно с помощью этой диаграммы оценить возможность кристаллизации гипса, кальцита и других кальцийсодержащих или карбонатных солей. Сделать это позволяет физико-химическое компьютерное 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.

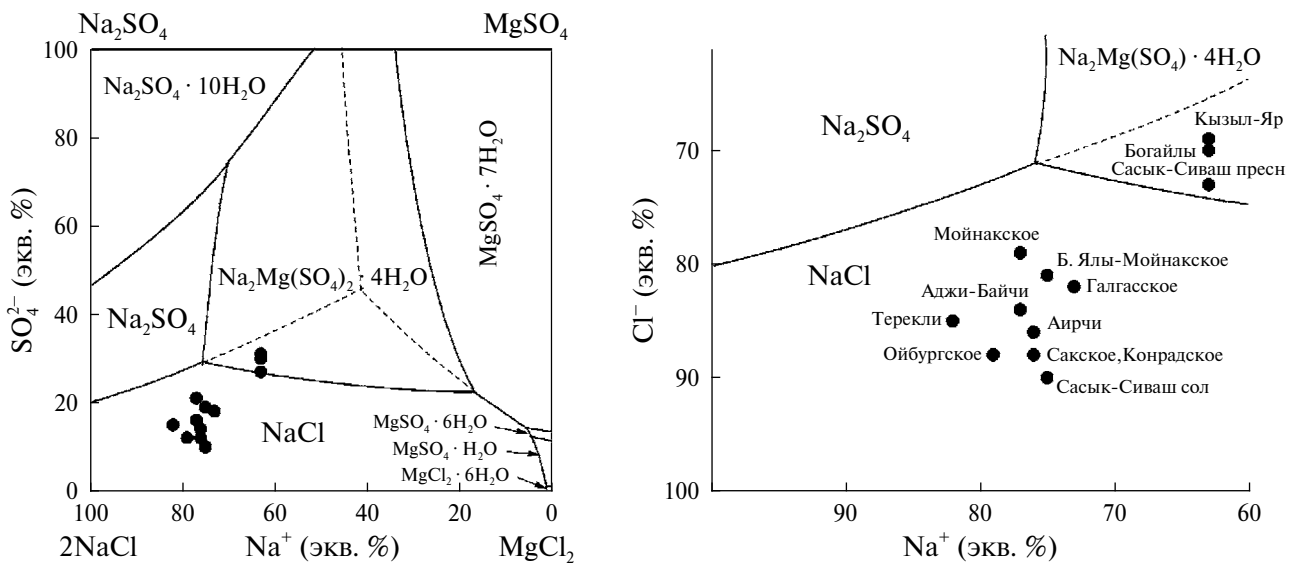


Рис. 6. Фигуративные точки озер Евпаторийской группы на диаграмме растворимости четырехкомпонентной взаимной системы Na^+ , Mg^{2+} // Cl^- , SO_4^{2-} – H_2O и при 25°C . Сплошные линии отвечают стабильным равновесиям, пунктирные – метастабильным. Диаграмма построена по данным [26].

Количественная характеристика степени насыщенности – индекс насыщенности (SI); под ним понимается следующая величина:

$$SI = \lg \left[\frac{a_M^{v_M} a_X^{v_X}}{PP_{MX}} \right]^{\frac{1}{v_M + v_X}},$$

где M – катион, X – анион, a_M и a_X – значения активности катиона и аниона, v_M и v_X – числа ионов M и X в формуле электролита MX , а PP_{MX} – величина его 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 вод озер Евпаторийской группы приведены в табл. 4 и на рис. 7. Все значения относятся к опробованию, проведенному в августе–октябре 2016 г. Индексы насыщенности рассчитаны по всем солям, включенным в базу данных термодинамического моделирования (в данном случае их 34), однако в табл. 4 и на рис. 7 представлены величины SI по тем минералам, осаждение которых наиболее вероятно. Это, прежде всего, галит ($NaCl$), в поле кристаллизации которого попадают фигуративные точки большинства озер, а также малорас-

творимые карбонаты ($CaCO_3$ – кальцит и арагонит, $MgCa(CO_3)_2$ – доломит, $MgCO_3$ – магнезит) и гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Как следует из рис. 6, фигуративные точки вод трех озер принадлежат полю кристаллизации бледита ($Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$), но по нему эти воды очень далеки от насыщения – индекс насыщенности составляет -4.3 для оз. Богайлы, -8.4 для оз. Кызыл-Яр и -7.6 для пресной части оз. Сасык-Сиваш.

Как видно из табл. 4 и на рис. 7, наибольшее пересыщение наблюдается по магнийсодержащим карбонатам – доломиту и магнезиту, причем это характерно даже для наименее минерализованных вод оз. Кызыл-Яр и пресной части оз. Сасык-Сиваш. Видно, что закономерность изменения этих индексов одинакова. Максимальные значения характерны для наиболее соленых озер – Аирчи, Галгасского, Терекли, соленой части оз. Сасык-Сиваш; минимальные – для наименее соленых. По сравнению с доломитом и магнезитом, диапазон изменения индексов насыщенности по кальциту, арагониту и гипсу значительно меньше, причем пересыщение по кальциту и арагониту характерно для всех озер, а по гипсу наименее минерализованные воды оз. Кызыл-Яр и пресной части оз. Сасык-Сиваш не достигают насыщения. Заметим, что для этих двух озер, в отличие от всех остальных, пересыщение по карбонатам кальция больше, чем по

Таблица 4. Оценка степени насыщенности озерных вод Евпаторийской группы, 2016 г.

Дата отбора	Озеро	№ на рис. 1	Доломит	Магнезит	Кальцит	Арагонит	Гипс	Галит
4 октября	Ойбургское	1	2.7	1.1	0.76	0.57	0.08	-1.3
4 октября	Аджи–Байчи	2	3.6	1.9	0.93	0.74	0.09	-0.88
4 октября	Аирчи	3	4.7	2.8	1.1	0.91	0.28	0.09
5 октября	Галгасское	4	5.1	2.9	1.3	1.1	0.42	0.03
6 октября	Конрадское	6	3.9	2.1	0.97	0.79	0.03	-0.56
7 октября	Терекли	7	4.8	2.6	1.3	1.1	0.27	-0.09
4 октября	Большое Ялы–Мойнакское	8	3.9	1.6	1.4	1.2	0.14	-1.7
4 октября	Мойнакское	11	2.9	1.1	1.0	0.83	-0.01	-2.2
3 октября	Сасык–Сиваш (соленая часть)	12	3.7	2.3	0.56	0.37	0.09	0.08
3 октября	Сасык–Сиваш (пресная часть)	12	2.4	0.57	0.96	0.77	-0.51	-4.0
16 августа	Сакское, Вост. бассейн	13	3.8	1.9	1.1	0.91	0.12	-0.86
4 октября	Кызыл–Яр	14	1.5	0.09	0.62	0.43	-0.67	-4.5
3 октября	Богайлы	15	3.3	1.4	1.2	0.96	0.12	-2.4

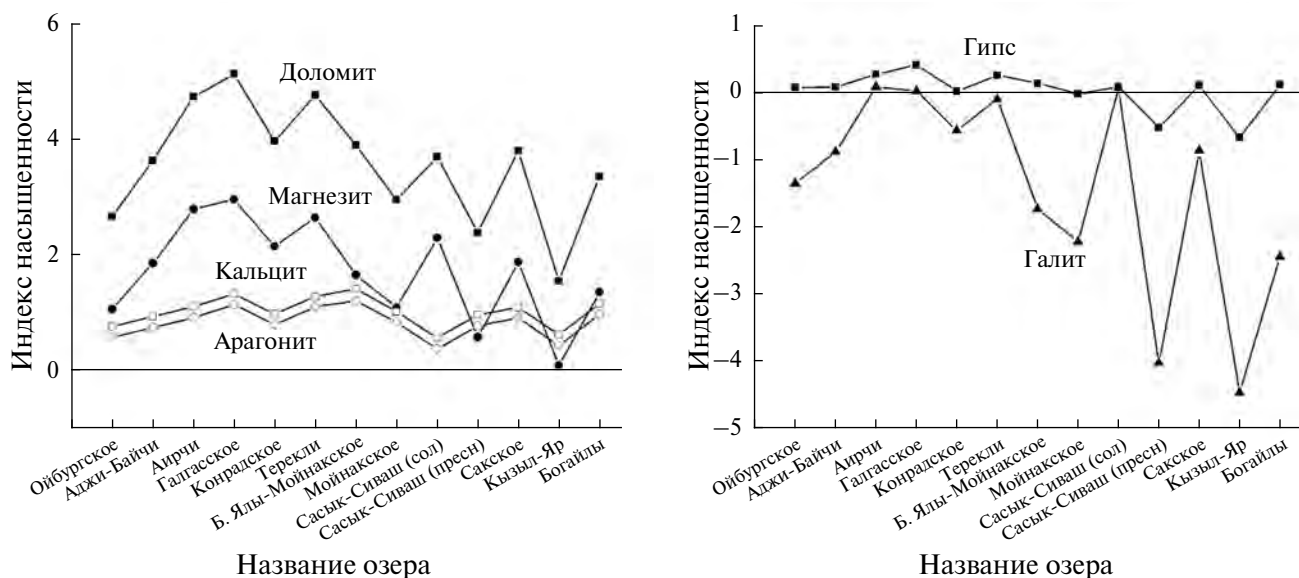


Рис. 7. Сравнительная оценка насыщенности озерных вод Евпаторийской группы (август–октябрь 2016 г.).

магнезиту. Наконец, небольшие положительные индексы насыщенности по галиту ожидаемо наблюдаются в наиболее соленых озерах – Аирчи, Галгаском, в соленой части оз. Сасык-Сиваш. Очень близкое к нулю значение SI получено и для оз. Терекли, т. е. и здесь рапа близка к равновесию с $NaCl$.

Рассчитанные положительные индексы насыщенности означают, что в озере возможно осаждение соответствующих солей, в результате чего будет достигнуто стабильное термодинамическое равновесие. Однако на самом деле пересыщение является необходимым, но не достаточным условием для образования осадка. Очень часто реализуется метастабильное равновесие, когда пересыщение может быть весьма устойчивым и не приводит к образованию твердой фазы. Это относится прежде всего к карбонатам кальция и магния, условия образования которых из пересыщенных растворов являются предметом многочисленных публикаций. Как отмечает автор монографии [25], основная масса всех морских карбонатов имеет биогенное происхождение, а самопроизвольное неорганическое осаждение карбонатов в результате одного лишь пересыщения – очень редкое событие. Помимо пересыщения, целый ряд факторов влияет на вероятность осаждения как карбонатов в целом, так и конкретных минералов (кальцита, араго-

нита, магнезита, доломита) в частности [35]. Это биотический фактор, температура, рН минералообразующей среды, соотношение в ней ионов Mg и Ca , присутствие других ионов, содержание органического вещества. Следует также учитывать, что найденные в донных осадках карбонаты кальция и магния могут быть не первичными эвапоритовыми минералами, а продуктами изменения гипса или ангидрита, образующимися в бескислородной обстановке в результате деятельности микроорганизмов, либо продуктами изменения известняков, контактирующих с рассолами [25, 35].

К сожалению, авторы не располагают данными о детальном минеральном составе донных осадков всех рассматриваемых озер. В работе [23] сказано лишь о гипсовой и известняковой корке, под которой залегают черный и серые илы. В недавнем исследовании [24], посвященном изучению толщи илов Сакского озера, приводится состав грязи Восточного и Западного бассейнов. Из соляных минералов в них содержится (в пересчете на сухое вещество) 29.5% гипса, 10.69% карбоната кальция и 3.53% карбоната магния (Восточный бассейн); 10.22% гипса, 15.09% карбоната кальция и 4.73% карбоната магния (Западный бассейн). При этом иловая толща покрыта гипсовой коркой, которая начала формироваться с 1894 г. (когда была возведена

дамба) и в настоящее время образует сплошной панцирь. Что касается карбонатов кальция и магния, то они не находятся в непосредственном контакте с поверхностными рассолами, так как содержатся в илах, отобранных с глубин 0.4–0.6, 0.8–1.0 и 1.8–2.0 м. Авторы [24] отмечают, что состав этих илов в целом однотипный: глинистые минералы, кристаллы гипса и в меньшем количестве кристаллы кальцита, пирита, Sr-содержащего барита.

Таким образом, стабильное равновесие раствор – твердая фаза в оз. Сакском наблюдается именно для поверхностных рассолов с гипсом, а не с карбонатами кальция и магния, образование которых, возможно, не связано с прямым осаждением из жидкой фазы в результате ее пересыщения. Как следует из рис. 7, равновесие с гипсом характерно и для остальных озер, за исключением наименее минерализованных вод оз. Кызыл-Яр и пресной части оз. Сасык-Сиваш. Отметим, что, в отличие от карбонатов кальция и магния, для гипса характерны близкие к нулю или невысокие положительные индексы насыщенности, что говорит о большей склонности гипса к стабильным, чем к метастабильным равновесиям, когда уже при небольшом пересыщении соль из раствора переходит в твердую фазу. Еще в большей степени это свойство выражено в случае хорошо растворимых солей – в данном случае для галита. На рис. 7 и в табл. 4 не видно для него заметных положительных значений индекса насыщенности – при малейшем пересыщении образуется осадок галита и пересыщение снимается.

Для оценки изменения гидрохимических условий с течением времени были рассчитаны аналогичные индексы насыщенности вод восьми озер Евпаторийской группы (Ойбургского, Аджид-Байчи, Аирчи, Галгасского, Большого Ялы-Мойнакско, Мойнакского, Сакского, Кызыл-Яр), по данным за август–сентябрь 1965 г. [23]. Результаты представлены на рис. 8.

Можно видеть, что наиболее резкое изменение степени насыщенности, причем по всем минералам, характерно для оз. Кызыл-Яр. В отличие от 1965 г., в 2016 г. его вода перестала быть насыщенной по гипсу, стала еще дальше от

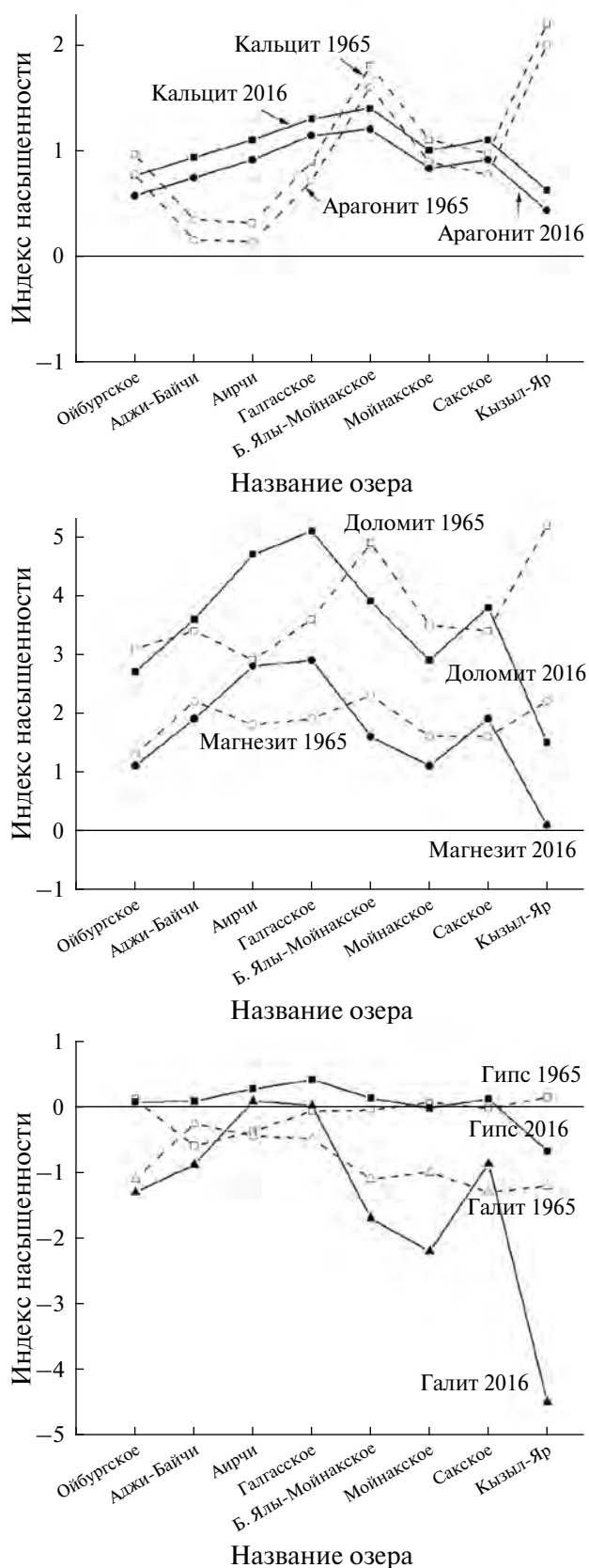


Рис. 8. Сравнительная характеристика насыщенности озерных вод Евпаторийской группы по данным 1965 и 2016 гг.

насыщения по галиту, и хотя она осталась пересыщенной по карбонатам кальция и магния, степень этого пересыщения значительно уменьшилась. Причиной такой трансформации соленого озера в пресноводный водоем послужил ввод в эксплуатацию в начале 1980-х гг. Межгорного водохранилища [6]. В результате постоянной фильтрации пресной воды из водохранилища сквозь карстовые породы гидрологический режим озера перешел в состояние неустойчивого дисбаланса с четкой тенденцией к распреснению и накоплению объема водной массы [6].

К сожалению, в монографии А.М. Понизовского [23] отсутствуют данные о химическом составе вод оз. Богайлы, и поэтому его индексы насыщенности отсутствуют на рис. 8. Между тем известно, что и оно, подобно оз. Кызыл-Яр, подверглось распреснению в результате антропогенного воздействия. Так, в оз. Богайлы в начале 1970-х гг. сливались отходы совхоза им. Фрунзе и его птицефабрики [6, 28]. При этом произошло не только уменьшение минерализации озерных вод, но и изменение соотношения солевых компонентов, в результате чего фигуративные точки озера Кызыл-Яр и Богайлы принадлежат полю кристаллизации бледита, а не галита – это следует из диаграммы растворимости на рис. 6.

В противоположность оз. Кызыл-Яр, с 1965 по 2016 г. практически не изменилась степень насыщенности вод оз. Ойбургского – самого северного в Евпаторийской группе. Для остальных озер на рис. 8 наблюдаются различные тенденции в изменении степени насыщенности по карбонатам кальция и магния, гипсу и галиту. Например, равновесие рассолов с гипсом осталось неизменным в случае вод озер Галгасского, Мойнакского, Большого Ялы-Мойнакского и Сакского, но несколько изменилась степень их насыщенности по галиту. Очевидно, что насыщенность гипсом поддерживается в результате наличия гипсовой корки, покрывающей дно этих озер, а изменения индекса насыщенности по галиту, особенно заметные для небольших озер, связаны с естественными колебаниями количества атмосферных осадков. Обращают на себя внимание два небольших озера Аирчи и Аджиджи-Байчи, воды которых, по данным 1965 г., не достигали насыщения по гипсу, но характер-

но для них в 2016 г. К сожалению, нет данных о минеральном составе донных осадков этих озер, чтобы проверить справедливость полученных теоретических результатов.

Что касается изменения степени насыщенности вод по карбонатам кальция и магния, то оно, как можно видеть из рис. 8, в ряде случаев имеет разнонаправленный характер для карбонатов кальция и магнийсодержащих минералов. Для всех озер индекс SI положителен, что, как уже было сказано, не обязательно приводит к осаждению карбонатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что за последние 50 лет все озера Евпаторийской группы сохранили сульфатный тип (сульфатно-магниевый подтип). Питание озер осуществляется за счет атмосферных осадков, подземных и морских вод. Воды всех озер пересыщены по карбонатам кальция и магния, насыщение по гипсу не достигается лишь в оз. Кызыл-Яр и пресной части оз. Сасык-Сиваш. Воды соленой части оз. Сасык-Сиваш, а также озер Аирчи, Галгасского, Терекли насыщены по галиту.

Сравнение с данными 1965 г. показало, что за прошедшие 50 лет наиболее резкое изменение степени насыщенности, причем по всем минералам (кальциту, арагониту, доломиту, магнезиту, гипсу, галиту), произошло с водами оз. Кызыл-Яр, что связано с его техногенным распреснением. Антропогенному воздействию подверглось и оз. Богайлы, но здесь невозможно провести количественное сравнение в связи с отсутствием данных за 1965 г. Эти озера в настоящее время не могут относиться к категории лечебных.

За 50 лет практически не изменилась степень насыщенности вод оз. Ойбургского; для остальных озер отмечены различные тенденции в изменении степени насыщенности по карбонатам кальция и магния, гипсу и галиту. Так, равновесие поверхностных рассолов с гипсом осталось неизменным в случае вод озер Галгасского, Мойнакского, Большого Ялы-Мойнакского и Сакского, но несколько изменилась степень их насыщенности по галиту. Очевидно, что насы-

шенность гипсом поддерживается в результате наличия гипсовой корки, покрывающей дно этих озер, а изменения индекса насыщенности по галиту, особенно заметные для небольших озер, связаны с естественными колебаниями количества атмосферных осадков.

Анализ климатических данных позволяет предположить, что климатические изменения не оказали существенного влияния на трансформацию химического состава вод озер Евпаторийской группы, в отличие от антропогенного воздействия.

Вмешательства человека, нарушающие естественный водный режим озер, стали причиной того, что некогда лечебная рапа превратилась в солоноватую воду, не обладающую терапевтическими эффектами (озера Кызыл-Яр, Богайлы). В то же время бесконтрольное использование рапы для нужд санаториев, как это, например, происходило с Мойнакским озером, также отразилось на лечебных свойствах озерных вод. При этом западный берег Крыма самой природой создан как естественный курорт, и задача общества на современном этапе состоит в осознании ответственности за сохранение лечебных ресурсов Крыма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматический справочник по Крымской области. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 135 с.
2. *Валяшко М.Г.* Закономерности формирования месторождений солей. М.: МГУ, 1962. 398 с.
3. *Васенко В.И., Егоров Л.В.* Виды хозяйственного использования прибрежно-морских озер Крыма // Тр. Крымской АН. Симферополь: ИТ "Ариал", 2022. С. 6–19.
4. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода / Под ред. *С.Л. Шварцева*. Новосибирск: СО РАН, 2005. Т. 1. 244 с.
5. Гидрогеология СССР. Т. 8. Крым / Под ред. *В.Г. Ткачук*. М.: Недра, 1970, 351 с.
6. *Гулов О.А.* Экоцид крымских соляных озер // Теория и практика восстановления внутренних водоемов / Отв. ред. *В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев*. СПб.: ЛЕМА, 2007. С. 60–78.
7. ГОСТ 23268.3-78 Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Методы определения гидрокарбонат-ионов. М.: Госстандарт СССР, 1978. 18 с.
8. ГОСТ 26449.1-85 Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы химического анализа соленых вод. М.: Госстандарт СССР, 1985. 45 с.
9. *Дзенс-Литовский А.И.* Пересыпи и лиманы Азово-Черноморского побережья и Степного Крыма // Природа. 1938. № 6. С. 22–36.
10. *Иващенко А.С., Мизин В.И., Ежов В.В., Васенко В.И., Чабан В.В., Станкевич Д.А.* Бальнеологическое применение лечебных грязей и рапы месторождений западного и восточного Крыма в санаторно-курортной практике // Вестн. физиотерапии и курортологии. 2018. Т. 24. № 1. С. 43–51.
11. *Казанцев Ю.В.* Тектоника Крыма. М.: Наука, 1982. 112 с.
12. Климатический атлас Крыма / Сост. *И.П. Ведь*. Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
13. *Котова И.К., Каюкова Е.П., Мордохай-Болтовская Л.В., Платонова Н.В., Котов С.Р.* Закономерности формирования состава иловых грязей Мертвого моря и соляных озер Крыма // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 7. 2015. Вып. 2. С. 85–106.
14. *Курнаков Н.С., Кузнецов В.Г., Дзенс-Литовский А.И., Равич М.И.* Соляные озера Крыма. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936. 278 с.
15. *Курнаков Н.С.* Метаморфизация рассолов Крымских соляных озер // Зап. Императорского Санкт-Петербургского минерал. о-ва. Сер. 2. 1896. Т. 34. Вып. 2. С. 67–68.
16. *Курнаков Н.С., Жемчужный С.Ф.* Магниево-натриевые озера Перекопской группы // Изв. РАН. 1917. Т. 11. № 2. С. 137–162.
17. *Мушкетов И.В.* Заметка о происхождении различных типов крымских соляных озер // Горный журн. 1895. Т. 2. С. 344–392.
18. Научная летопись Сакского озера. Сб. аннотированных статей, изданных с 1828 по 2001 гг. / Под ред. *В.А. Хохлова*, сост. *О.А. Гулов*. Симферополь, 2001. 144 с.
19. *Павлова Н.Н.* Физическая география Крыма. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. 107 с.
20. *Паллас П.* Краткое физическое и топографическое описание Таврической области. Санктпетербургъ: Императорская Типографія, 1795. 75 с.
21. *Першке Л.* Соляные озера сѣвернаго прибрежья Чернаго моря и основанія для ихъ рациональной разработки, СПб.: Типографія и хромофотографія А. Траншеля, 1882. 145 с.

22. Погода и климат. Справочно-информационный портал. www.pogodaiklimat.ru (дата обращения: 27.01.2024)
23. *Понизовский А.М.* Соляные ресурсы Крыма. Симферополь: Крым, 1965. 263 с.
24. *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.
25. *Сонненфелд П.* Рассолы и эвапориты. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 480 с.
26. Справочник по растворимости солевых систем / Под ред. *А.Д. Пельша*. Л.: Химия, 1975. Т. 1. 1070 с.; Т. 2. 1063 с.
27. *Тарасенко В.С., Артов А.М., Амелина И.Н. и др.* Экология Крыма. Угрозы устойчивому развитию. План действий. Симферополь: Ариал, 2014. 183 с.
28. Устойчивый Западный Крым. Крымские золотые пески // Под ред. *В.С. Тарасенко*. Симферополь: Бизнес-информ, 2014. 472 с.
29. *Фиколина Л.А., Белецкий С.В., Белокрыс О.А. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третьей поколения. Сер. Скифская. Л. L-36 – Симферополь. Объяснительная записка с приложениями. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2019. 979 с.
30. *Чарыкова М.В., Куриленко В.В., Рудай И.Г., Сартакова О.Г.* Особенности гидрохимического режима озера Кучук // Вод. ресурсы. 1996. Т. 23. № 6. С. 699–704.
31. *Чарыкова М.В., Сартакова О.Г., Куриленко В.В.* Особенности гидрохимического режима залива Сиваш в современных условиях // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25. № 2. С. 217–222.
32. *Чарыкова М.В.; Чарыков Н.А.* Термодинамическое моделирование процессов эвапоритовой седиментации. СПб.: Наука, 2003. 262 с.
33. *Юдин В.В.* Геодинамика Крыма. Симферополь: ДИАЙПИ, 2011. 336 с.
34. *Юдин В.В.* О строительстве порта в Западном Крыму // Тр. Крымской АН. Симферополь, 2014. С. 124–129.
35. *Deocampo D.M., Jones B.F.* Geochemistry of saline lakes // Treatise on Geochem. Amsterdam: Elsevier Pergamon, 2014. V. 7. P. 437–469.
36. *Greenberg J.P., Moller N.* The prediction of mineral solubilities in natural waters: A chemical equilibrium model the Na-K-Ca-Cl-SO₄-H₂O system to high concentration from 0 to 250°C // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1989. V. 53. № 10. P. 2503–2518.
37. *Harvie C.E., Weare J.H., Hardie L.W., Eugster H.P.* Evaporation of seawater. Calculated mineral sequences // Sci. 1980. V. 208. P. 498–500.
38. *Harvie C.E., Eugster H.P., Weare J.H.* Mineral equilibria in the six-component seawater system Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-H₂O at 25°C. II. Compositions of the saturated solutions // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1982. V. 46. № 9. P. 1603–1618.
39. *Harvie C.E., Moller N., Weare J.H.* The prediction of mineral solubilities in natural waters: the Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO₄-OH-HCO₃-CO₃-CO₂-H₂O system to high ionic strengths at 25°C // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1984. V. 48. № 5. P. 723–751.
40. *Moller N.* The prediction of mineral solubilities in natural waters: A chemical equilibrium model for the Na-Ca-Cl-SO₄-H₂O system to high temperature and concentration // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1988. V. 52. № 4. P. 821–837.
41. *Nordstrom D.K., Campbell K.M.* Modeling low-temperature geochemical processes // Treatise on Geochem. Amsterdam: Elsevier Pergamon, 2014. V. 7. P. 27–68.
42. *Pitzer K.S.* Thermodynamics of electrolytes. I. Theoretical basis and general equations // J. Phys. Chem. 1973. V. 77. № 2. P. 268–277.

Salt lakes of the Crimea. 1. Modern hydrochemical features of lakes of the Evpatoria group

E. P. Kayukova^{a,*}, M. V. Charykova^a, V. I. Vasenko^b, A. A. Izhetnikova^b

^a*St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia*

^b*State Unitary Scientific and Production Enterprise of the Republic of Crimea "Crimean Hydrogeological Regime and Operation Station", Saki, 296500 Russia*

**e-mail: epkayu@gmail.com*

The article presents data on the chemical composition of waters of 12 salt lakes of the Crimean Peninsula belonging to the Evpatoria group. A brief description of the geomorphological and geological-hydrogeological features of these lakes is given. Using the method of physico-chemical modeling, the indices of water saturation for calcium and magnesium carbonates, gypsum, and halite were calculated. A similar calculation was also performed for the 1965 data, which made it possible to trace changes in the degree of saturation of lake waters over a 50-year period. The influence of human activity had a significant impact (in contrast to climate fluctuations) on the ecosystems of the Crimean salt lakes. This was especially evident in the transformation of the chemical composition of Lake Kyzyl-Yar and, to a lesser extent, Lake Bogayly.

Keywords: salt lakes of the Crimea, Evpatoria group, saturation, gypsum, halite, calcium and magnesium carbonates, brine of salt lakes.