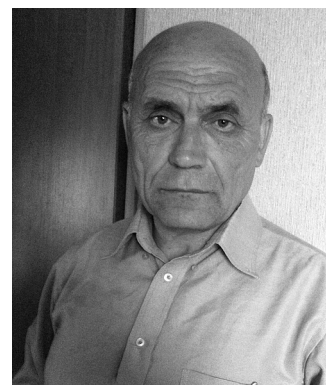


УДК 552.54:[553.981(26.03):551.351](477.75)



В.И. Лысенко



Н.В. Шик

Лысенко В.И.*,
Шик Н.В.**

Современные процессы образования карбонатов, связанные с углеводородной дегазацией, в бухте Ласпи (Южный берег Крыма)

*Лысенко Виталий Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент Севастопольского филиала МГУ имени М.В. Ломоносова (Крым, Украина)

E-mail: Niagara_sev@mail.ru

**Шик Николай Васильевич, специалист высшей категории, Коммунальное внешкольное учебное заведение «Центр туризма, краеведения, спорта и экскурсий учащейся молодежи» («ЦТКСЭ», Севастополь, Крым, Украина)

E-mail: Shik.n@bk.ru

Приводятся результаты геологических исследований выходов холодной дегазации углеводородов в подводной части пляжной зоны бухты Ласпи. Здесь, как и на больших глубинах, вокруг участка газовых струй в активной геодинамической среде формируется оазис жизни с карбонатной постройкой. Высокие скорости цементации галечников указывают на очень молодой возраст современных карбонатных построек Черного и других морей

Ключевые слова: углеводород, метан, арагонит, дегазация, карбонатная постройка, археи.

Новые данные, полученные при изучении жизни экосистем и продуктов гидротермальной деятельности в районах срединных океанических хребтов, заставили ученых по иному взглянуть на процессы холодной дегазации углеводородов дна морей и океанов. Они известны на континентальных окраинах морей всех океанов, а также во внутренних морях и на озере Байкал¹.

Наиболее детально процессы глубинной дегазации изучены в Черном море. Сипы² метана в основном приурочены к шельфу и континентальному склону, но также имеются находки струйного выделения метана и в котловине Черного моря, возможно, около грязевых вулканов. На материковом склоне встречаются карбонатные постройки и струйные выходы метана, приуроченные к выходам магматических пород Ломоносовского массива³.

При разгрузке метана в водной толще часть его утилизируется археями, большая часть растворяется в воде и отлагается рядом в виде газогидратов. Незначительная часть окисляется в аэробных условиях и попадает в атмосферу. Предполагается, что в процессах хемосинтеза метана археями около 30% перерабатывается в биогенное органическое вещество, а остальная часть окисляется до углекислоты. Возможно, энергия окислительных реакций используется археями для создания сложных органических продуктов хемосинтеза. Значительная часть углекислоты, выделяемая метан редуцирующими бактериями и археями при создании органики, используется для строительства карбонатных построек, на которых располагаются специфические бактериальные маты. Часть углекислого газа для этого строительства поступает из недр⁴. Доказательством этого является современный газовый состав флюидов поверхностных грязевых вулканов и изотопный состав карбонатов из построек⁵.

Высказывается предположение, что процессы струйного выделения метана происходят не только в глубоководной части Черного моря, но и в мелководной прибрежной зоне и на прилегающей суше. Формирование береговой линии Черного моря находится под контролем тектоники, а многие разломы суши имеют продолжение в море. К некоторым из них приурочены зоны дегазации. Имеются данные описания пузырьковых выходов газа у берегов Тарханкута, Керченского полуострова, Севастопольской и Ласпинской бухт⁶.

¹ Крылов А.А., Хлыстов О.М., Земская Т.И. и др. Формирование аутигенных карбонатов в грязевых вулканах озера Байкал // Геохимия. 2008. № 10. С. 1051–1062

² Сипы (seep) – холодная спокойная разгрузка флюидов на дне морей и океанов.

³ Шнюков Е.Ф., Щербakov Е.Е., Шнюкова Е. Е. Палеоостровная дуга севера Черного моря. Киев, 1997. 287 с.

⁴ Там же.

⁵ Шнюков Е.Ф., Гнатенко Г.И., Нестеровский В.А. и др. Грязевой вулканизм Керченско-Таманского региона. Киев.: Наук. Думка, 1992. 199 с.

⁶ Лушник А.В., Морозов В.И., Палин В.П. и др. Особенности формирования подземных вод в западной части Равнинного Крыма (на примере района бухты Очеретай) // Геол. журн. 1985. Т. 45. № 3. С. 101–107; Шик Н.В. Газовые выделения на дне бухты Ласпи // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2006. № 1. С. 135–136



Рис. 1. Побережье бухты Ласпи с зоной пузырькового выхода газа в подводной части пляжной зоны.

та. В рыхлых отложениях отмечаются фрагменты псевдослоистости, которые указывают на несколько этапов формирования этой толщи. В этой же части наблюдается прерывистый горизонт погребенных почв.

Породы таврической серии представлены серо-черными глинами с прослоями песчаников, алевролитов³ и аргиллитов⁴. Отложения сильно перемяты и слагают нижнюю часть подводной абразионной террасы⁵, на которой залегают пляжные галечники. Породы таврической серии слагают ядро Ласпинской антиклинали. Прямолинейная береговая линия и смятие пород свидетельствуют о наличии тектонической зоны, по которой опущена юго-восточная часть антиклинали. Поля струйного выделения метана из пород таврической серии связаны с одной из линейных зон разлома. Мощность морских пляжных отложений не превышает одного метра. Они представлены отдельными валунами, галечником, гравием и песками. По составу преобладают галечники и валуны юрских известняков⁶ (70%), песчаников и алевролитов таврической свиты (20%), кварца (5%) и магматических пород (5%). Обломочный материал размером от 0,1 до 2000,0 мм (преобладающая фракция 30,0–80,0 мм) хорошо окатан, а преобладающая часть галек – плоской формы. Размеры и форма обломочного материала указывают на его формирование в активной гидродинамической среде береговой зоны.



Рис. 2. Поверхность карбонатной постройки, покрытая бактериальными матами, мшанками и тонкой арагонитовой корочкой. В центральной части псевдокальдеры выходов газа (1). Обр. Л-14, ув. – 3. Бухта Ласпи, Южный берег Крыма

Изучаемым районом проявления современной газовой дегазации на мелководье Черного моря является бухта Ласпи на южном берегу Крыма. Здесь выходы газа были обнаружены Н.В. Шиком летом 2004 г.¹. Участок находится на расстоянии 15,0–20,0 метров от береговой линии и приурочен к центральной части бухты (рис. 1). Глубина моря в зоне выходов составляет около двух метров. Особый интерес представляет геолого-геоморфологическая обстановка. Берег напротив выходов газа представляет собой абразионный уступ высотой около двенадцати метров, сложенный породами таврической серии². Сверху перекрыт четвертичными пролювиально-делювиальными отложениями, которые представлены глыбами, валунами, гравием и щебнем известняков, песчаников и алевролитов. Этот обломочный материал сцементирован песчано-глинистым цементом серовато-коричневого цвета.

Поле выходов пузырьков газа общей площадью около 500 кв. м. состоит из точечных выходов газа на локальном скальном образовании. Последнее представляет асимметричный вал, размером 30,0×10,0 м и высотой до 0,5 м с пологой наклонной поверхностью в сторону открытого моря и резким уклоном до 50 градусов в сторону берега. Валообразная гряда окружена со всех сторон отложениями галечников и песка. Вал вытянут вдоль простирания береговой линии. Наблюдения за выходами газа проводились в летний период с 2004 по 2011 гг. Они показали, что за это время изменилось местоположение конкретных точек выходов пузырьков газа и их количество, но сам участок дегазации остался на том же месте. В разные годы насчитывается от 8 до 15 струйных выходов. Частота выходов пузырьков составляет от 5 до 20 за десять секунд. Наблюдается некоторая периодичность выбросов и постоянство их нахождения в определенной точке в течение летнего периода наблюдений. В местах выхода газа отмечаются небольшие воронки диаметром 0,5–1,5 см (rockmark), окруженные миллиметровыми валиками (рис. 2). Такие псевдокальдеры характерны для

¹ Шик Н.В. Указ. соч.

² Наиболее древние осадочные образования в Горном Крыму, датируемые верхним триасом – средней юрой.

³ Обломочная твердая порода, состоящая из зерен размером от 0,001 до 0,1 мм.

⁴ Твердая, камнеподобная глинистая горная порода.

⁵ Пологая волноприбойная площадка.

⁶ Плотный мраморовидный известняк, образование которого связано со вторым периодом мезозойской эры.

карбонатных построек Черного, Охотского и Норвежского морей¹.

Большая часть слабоволнистой поверхности вала покрыта тонким слоем желеподобного мата серовато-розового цвета (рис. 2). Под матами поверхность отложений перекрыта тонкой (1,0–3,0 мм) пористой корочкой игольчатого арагонита² серовато-белого цвета с шелковистым блеском на изломе. Под микроскопом заметна микрополосчатость арагонитового слоя, которая придает ему внешнее сходство с карбонатными отложениями травертинов³. На внешней поверхности отдельных галек известняков отмечается большое количество вертикальных пор и отверстий, созданных современными сверлящими организмами – моллюсками *Pomotoceros triqueter*. Их размеры составляют от 0,01 до 6,0 мм, а глубина до 25,0 мм. Часто отверстия расширяются в нижней части.

Образцы из средней и нижней части карбонатной постройки бухты Ласпи показали, что она сложена конгломератами и гравелитами на карбонатном цементе (рис. 3, 4). Они имеют слабовыраженную слоистость, повышенную пористость и содержат большое количество мелких створок двухстворчатых моллюсков и трубок серпул. Литологический состав обломочного материала не отличается от галечников пляжа, а отличие гранулометрического состава заключается в более хорошей сортировке, которая проявляется в однородности форм обломков и их размеров (от 1,0 до 3,0 см). Это объясняется условиями отложения конгломератов в более спокойной обстановке на этих глубинах.

Цементом конгломератов и гравелитов является желто-белая карбонатная пленка толщиной от 0,5 мм до 5,0 мм, которая образуется вокруг галечного материала (рис. 3). Часть пленочного цемента представлена волокнистым арагонитом белого цвета. На поверхности гальки известняков и в пустотах цемента конгломератов встречаются звездчатые сrostки кристаллов арагонита (размером 2,0–4,0 мм) и новообразования прозрачного кальцита призматической формы до 3,0 мм (рис. 4). Иногда между галечным материалом встречаются сферолиты сноповидных удлиненных кристаллов арагонита, размером от 1,0–3,0 мм. Похожие формы выделения приводятся при описании карбонатных построек Черного, Охотского и Норвежских морей⁴.

Часть галек в конгломератах покрыта черной пленкой, иногда такие черные примазки развиваются и по трещинам в породе, что является доказательством образования конгломератов в восстановительной среде. Это черное биоуглеродное вещество при прокаливании сгорает. Процессы покрытия обломочного материала «аутигенных» карбонатных отложений черной пленкой в местах дегазации метана описаны в Норвежском, Охотском, Черном и Каспийском морях, в озере Байкал и Мексиканском заливе⁵.

Возможно, в зоне выхода метана бухты Ласпи происходит его частичная переработка метанотрофными бактериями и сообществом архей⁶ в органическое вещество и угольную кислоту. Поэтому процессам накопления галечников сопутствуют «мгновенный» диагенез и цементация, т.е. превращения в конгломераты. Доставка галечного материала волновыми процессами на поверхность карбонатной постройки и его цементация происходят одновременно. На высокую скорость цементации указывают многочисленные находки в центральной части постройки крупных кристаллов арагонита и кальцита, мелких створок раковин двухстворчатых моллюсков и серпул.

Возможность таких высоких скоростей образования карбонатного цемента подтверждаются экспериментами, проведенными в Институте микробиологии РАН. Всего несколько



Рис. 3. Галька юрских известняков, сцементированная пленочным карбонатным цементом. В верхней части трубочки серпул. Обр. 136, ув. - 7. Бухта Ласпи, Южный берег Крыма

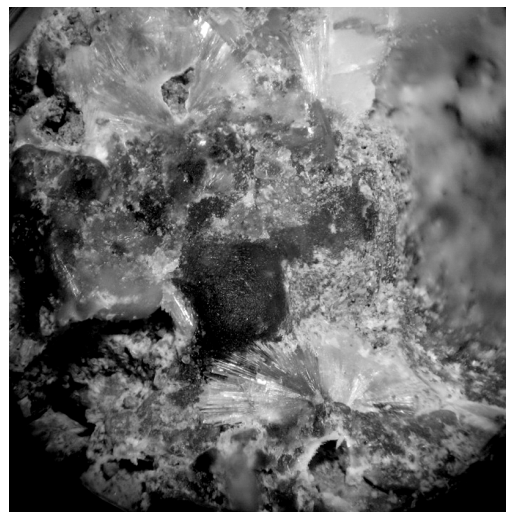


Рис. 4. Звездчатые сrostки кристаллов арагонита на гальке конгломератов. Обр. Л-30, ув. -6. Бухта Ласпи, Южный берег Крыма

¹ Леин А.Ю., Пименов Н.В., Саввичев А.С. и др. Метан как источник органического вещества и углекислоты карбонатов на холодном сипе в Норвежском море // Геохимия. 2000. № 3. С. 268–281; Рязанов А.К. Газ и газовые туманы на шельфе Черного моря // Докл. АН УССР. 1996. № 4. С. 90–94; Ткешелашвили Г.И., Егоров В.Н., Мествиришвили Ш.А. и др. Метановые газовыделения со дна Черного моря в приустьевой зоне реки Супса у побережья Грузии // Геохимия. 1997. № 3. С. 331–335

² Минерал карбоната кальция ромбической сингонии, который при высоких температурах переходит в кальцит.

³ Тонкозернистая горная порода, образованная в результате осаждения из воды минералов карбоната кальция.

⁴ Леин А.Ю. Жизнь на сероводороде и метане // Природа. 2005. № 12. С. 1–14; Шнюков Е.Ф., Щербаков Е.Е., Шнюкова Е.Е. Указ. соч.

⁵ Леин А.Ю., Пименов Н.В., Саввичев А.С. и др. Указ. соч.

⁶ Одноклеточные микроорганизмы, не имеющие ядра и каких-либо мембранных оргanelл.

часов требуется для того, чтобы чехлы бактерий окаменели¹. В сезон активных динамических процессов, связанных с зимними штормами, часто происходит разрушение карбонатной постройки и на пляж выбрасываются плитчатые глыбы конгломератов. За небольшой промежуток времени к летнему периоду зона дегазации залечивает свои «раны» за счет жизнедеятельности биологических сообществ. Можно считать, что вал вокруг полей струйной дегазации углеводородов, сложенный конгломератами, является своеобразной карбонатной постройкой бухты Ласпи.

Анализ цемента и известняка из галек конгломератов показал, что содержание меди, свинца, никеля, кобальта, цинка, ванадия и бора в карбонатном цементе (табл. 1) в несколько раз выше, чем в галечниковом материале. Именно такие повышенные содержания характерны для донных выбросов газа бухты Очеретай и современных глубинных карбонатных построек Черного и других морей². Данные геохимии являются одним из доказательств, что процессы карбонатизации связаны с дегазацией углеводородов из недр. Органическое вещество и карбонаты являются продуктом взаимодействия литосферы (источник поступления гидротермальной энергии и газов из недр), гидросферы (среда образования), атмосферы (газовые пузырьки углеводородов, сероводорода и углекислого газа) и биосферы (строители карбонатных построек и биогенного органического вещества). Возможно, некоторая часть карбоната в постройках образована за счет углекислого газа из недр, но большая часть карбонатного материала создана живым веществом.

Таблица 1

**Содержание химических элементов (в %)
из образцов карбонатного цемента конгломератов, известняков галек бухты Ласпи
и донных проб бухты Очеретай**

Номер пробы	Cu, n 10 ⁻³	Pb, n 10 ⁻⁴	Co, n 10 ⁻⁴	Ni, n 10 ⁻⁴	Zn, n 10 ⁻³	V, n 10 ⁻⁴	As, n 10 ⁻⁵	B, n 10 ⁻³
Л-41-А	0,05	6,3	8	20	5	1,2	20,1	6
Л-42-А	0,1	12,3	3,5	10	15	3,4	18,5	2
Л-43-А	—	0,01	—	—	0,03	—	—	0.05
№ 2 (воронка)	1,2	10	5	15	1,2	8	—	4

Примечание: Л-41-А, Л-42-А – образцы цемента конгломератов из карбонатной постройки бухты Ласпи. Л-43-А – известняк галек из конгломератов. Анализы выполнены рентген – флуоресцентным методом в лаборатории филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Севастополь, аналитик Котольянец Е.А.. Анализ № 2 – из донных отложений бухты Очеретай³.

Объемы выбросов газа на больших глубинах Черного моря в сотни раз больше, чем бухте Ласпи. Поэтому скорость и масштабы карбонатизации на шельфе и на континентальном склоне значительно превышают образование карбонатов в пляжной зоне. Наличие на постройках, поднятых с больших глубин, микробных матов позволяет нам утверждать, что там идут интенсивные современные процессы образования карбонатного материала⁴. На дне Черного моря существует следующее разнообразие связей между дегазацией, карбонатизацией и наличием жизни. Большая часть участков струйного выделения газов на шельфе и континентальном склоне характеризуется наличием бактериальных матов и процессов карбонатизации. Известны точки дегазации, где отсутствует жизнь и карбонатные постройки, что связано с молодым возрастом газовых струй углеводородов. Встречаются карбонатные постройки, где нет бактериальных матов из-за прекращения процессов дегазации углеводородов. Следует предположить, что разросшиеся карбонатные постройки могут перекрывать места выходов газа, что приводит к приостановке и замедлению этих процессов. Дегазация метана обычно приурочена к крупным тектоническим зонам, поэтому сейсмические процессы время от времени могут разрушать эти хрупкие постройки и создавать условия для строительства новых. Возраст карбонатных построек на дне Черного моря в соответствие с ростом глубины изменяется от трех тысяч до семнадцати тысяч лет и более. Одни исследователи объясняют это процессами колебаний верхней границы сероводородной зоны⁵, другие – фазами глобального оледенения и структурной перестройкой зон разломов с участками дегазации.

Высказывается предположение, что для строительства карбонатных построек используется метан, который образуется за счет переработки органического вещества древне-черноморских отложений, возрастом более 3,5 тысяч лет. В этом случае трудно определить время, когда происходил этот процесс строительства, и объяснить, почему нижняя часть карбонатной постройки сложена углеводородом из более древних пород, а верхняя – из более молодых.

С чем же действительно связаны такие относительно большие цифры возраста современных карбонатных построек, полученные с помощью радиоуглеродного метода? Авторы статьи считают, что при интерпретации результатов не учитывались следующие факторы: образование изотопа углерода ($\delta^{14}\text{C}$) из азота происходит в

¹ Розанов А.Ю., Заварзин Г.А. бактериальная палеонтология // Вестник РАН. 1997. Т. 67. № 3. С. 241–245.

² Лущик А.В., Морозов В.И., Палин В.П. и др. Особенности формирования подземных вод в западной части Равнинного Крыма (на примере района бухты Очеретай) // Геол. журн. 1985. Т. 45. № 3. С. 101–107.

³ Там же.

⁴ Леин А.Ю., Пименов Н.В., Саввичев А.С. и др. Указ. соч..

⁵ Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Нежданов А.И. и др. Явление активного газовыделения из поднятий на свале глубин западной части Черного моря // Докл. АН УССР. 1989. № 12. С. 13–16; Пименов Н.В., Русанов И.И., Поглазова М.Н. и др. бактериальные обрастания на коралловидных постройках в местах выхода метановых газовыделений в Черном море // Микробиология. 1997. № 6. С. 7–14.

верхних слоях атмосферы под воздействием космического и нейтронного излучений¹; поступление изотопов ($\delta^{14}\text{C}$) из атмосферы в водную среду Черного моря происходит через некоторый промежуток времени²; отсутствует или очень слаба вертикальная циркуляция водных масс с изотопами ($\delta^{14}\text{C}$) в сероводородной зоне, что связано с градиентом солености; колебания содержаний изотопов углерода $\delta^{13}\text{C}$ в образцах построек означает открытость системы его поступления; образование карбонатных построек происходит в основном за счет поступления метана и углекислого газа из недр, а незначительная часть — за счет углекислоты из окружающей водной среды; при осаждении карбоната процессами биологического окисления метана используется в основном легкий углерод и происходит обеднение его тяжелыми изотопами.

Перечисленные факторы могут завышать возраст карбонатных построек. В тоже время на современный возраст их образования указывают обростание их бактериальными матами, находки в них мелких карбонатных включений (бактериальный жемчуг)³ и сохранностью хрупких древовидных карбонатных построек высотой до пяти метров в сейсмической зоне. Установлены факты удрежнения возраста за счет влияния глубинной дегазации углеводородов. Современный мох, растущий в гидротермальных водах поверхностных вулканов, имеет радиоуглеродный возраст 6000–8000 лет⁴, а возраст современных кораллов, образовавшиеся за последние несколько лет, оказывается 250 лет, так как из атмосферы в морскую воду углекислота попадает с запозданием⁵. В будущем, чтобы привести «радиоуглеродный» возраст карбонатных построек к «календарному», необходимо ввести поправки на дегазацию, скорость циркуляции водных масс и глубину их находки. Численное значение этих показателей можно получить при исследовании конкретных эталонных объектов на шельфе, континентальном склоне и котловине Черного моря подводными аппаратами в течение нескольких лет.

По нашему предположению процессы выделения газа в прибрежной части бухты Ласпи имеют одну природу с дегазацией больших глубин морей, океанов и озера Байкал. Выделение газов приурочено к зонам глубинных разломов с современной тектонической активностью. На связь с глубинной дегазацией и тектоникой указывают факторы: импульсный периодически непостоянный характер выбросов по составу и объему; присутствие в пробах кроме метана, газов тяжелых углеводородов, сероводорода, двуокиси углерода, азота и водорода; изменение минерализации морских вод около источников газирования и содержания сероводорода⁶; аномалии содержания J, Br, Se, Hg около струйных выходов⁷; повышенные содержания Cu, Pb, B, Ni, Zn, Ag, As; наличие аномалий гелия и неона (изотопный состав гелия указывает на его коровое происхождение)⁸; связь дегазации с зонами повышенного теплового потока⁹; линейность расположения отдельных карбонатных построек и струй выходов газа. Эндогенный характер процессов дегазации из пород таврической серии в бухте Ласпи подтверждается в первую очередь, отсутствием условий для накопления современной органики в пляжных галечниках для производства биогенного метана. На Южном берегу Крыма в горных выработках скважинах, пройденных по породам таврической серии, часто отмечаются выделения «горючего газа». В таких же породах находятся выходы высокогазирующего минерального источника Аджи-Су (Черные воды), который расположен в зоне Севастопольского-Ульяновского разлома глубинного заложения. Состав газов из источника Аджи-Су и горных выработок представлен азотом, метаном, углекислым газом, тяжелыми углеводородами и инертными газами (He, Ar, Kr, Xe)¹⁰. Высокие содержания гелия и тяжелых углеводородов в пробах газов являются доказательством глубинной природы дегазации.

В бухте Ласпи с валлообразной карбонатной постройкой связан местный «оазис жизни». Его богатство и разнообразие животного и растительного мира резко отличается от почти безжизненного окружения пляжных отложений галечника, гравия и песка. В «оазисе жизни» большая часть поверхности карбонатной постройки покрыта зарослями бурых и красных водорослей, колониями мшанок, на которых также отмечены микробные маты розовато-серого цвета. Они цементируют галечниковую часть карбонатной постройки в виде корки и консолидируют ее отдельные части в единое целое. Водорослевой покров и колонии мшанок являются своеобразной защитой карбонатной постройки от поверхностного волнового разрушения. Малоизученной является роль сверлящих организмов и водорослей, которые создают повышенную пористость в поверхностном цементном покрове и верхней части галек известняка (рис. 2). Возможно, карбонатный материал их растворения используется для образования цемента конгломератов. В большом количестве на поверхности встречаются карбонатные трубки полихет. Это червеобразные закрученные карбонатные постройки серпул и спиральные кольца спиробусов. Перерабатывая метан, микроорганизмы создают биопroduкцию для начального звена пищевой цепочки, в конце которой находятся бенточные рыбы. Бухта Ласпи в весенне-зимний период является местом нагула и размножения кефали и пеленгаса. Правда, вопросами существования взаимосвязи кормовой базы промысловых рыб с местами дегазации на Черном море никто не занимался. Это природное явление хорошо изучено в водах Каспийского моря и Мексиканского залива, где по изотопному составу тканей животных уста-

¹ Арсланов Х.А. Радиоуглерод: Геохимия и геохронология. Л.: ЛГУ, 1987. 300 с.; Николаев С.Д., Свиточ А.А. Ядерные методы абсолютной геохронологии. Методы палеографических реконструкций. М.: МГУ, 2010. С. 332–342.

² Лушник А.В., Морозов В.И., Палин В.П. и др. Указ. соч.

³ Гальченко В.Ф. Метанотрофные бактерии. М.: ГЕОС, 2001. 500 с.

⁴ Тюрин А.М. Три постулата радиоуглеродного датирования // Сборник статей по новой хронологии. 2009. вып. 8. С. 1–7.

⁵ Там же.

⁶ Ткешелашвили Г.И., Егоров В.Н., Мествиришвили Ш.А. и др. Метановые газовыделения со дна Черного моря в приустьевой зоне реки Супса у побережья Грузии // Геохимия. 1997. № 3. С. 331–335.

⁷ Костова С. К., Поповичев В. Н., Егоров В. Н. и др. Распределения ртути в воде и донных отложениях в местах локализации струйных метановых газовыделений со дна Черного моря // Морський екологічний журнал. 2006. Т.5. № 2. С. 47–55.

⁸ Holzner C.P., McGinnis D.F., Schubert C.J. Noble gas anomalies related to high-intensity methane gas seeps in the Black Sea // Earth and Planetary Science Letters. 2008. Vol. 256. N 3/4. P. 396–409.

⁹ Кутас Р. И. Геотермические условия зон газовыделения и грязевого вулканизма в Черном море // Геология морей и океанов. М., 2007. Т. 4. С. 108–110.

¹⁰ Черняк Н.И., Богаец А.Т., Плахотный Л.Г. и др. Нефтегазность // Геология СССР. Т. 8. М.: Недра, 1974. С. 64–66.

новлено их питание за счет органики, созданной метанотрофными бактериями¹ и доказана связь концентраций кормовых ресурсов осетровых рыб с местами дегазации углеводородов на дне Каспийского моря².

Для создания биоорганического вещества бактериями и археями с помощью хемосинтеза кроме углерода требуется кислород, водород, азот, сера, фосфор и вода с катионами K, Mg, Ca, Fe и Mg. Все эти элементы, кроме кислорода, входят в состав морской воды и газов из недр. Из-за высоких концентраций сероводорода и метана в местах дегазации процессы хемосинтеза в основном происходят в анаэробных условиях. В бухте Ласпи такие условия существуют на поверхности бактериальных матов и в конгломератах. Получение сложного органического вещества без кислорода и энергетических затрат невозможно. Поэтому процесс осуществляется консорциумом метанотрофных, метаногенных, нитротрофных и сульфатредуцирующих бактерий и архей. По-видимому, между ними происходит своеобразный обмен усвоенными элементами, органикой и энергией окисления углерода и серы. Кислород для получения органики и реакций окисления некоторые виды архей, по гипотезе одного из авторов статьи, научились получать за счет разложения воды. Этот процесс они усвоили в период, когда в гидросфере и атмосфере отсутствовали не только кислород, но и какие либо химические соединения с ним. Позднее этот метод извлечения кислорода из воды, переняли и используют цианобактерии и растения в процессах фотосинтеза. Производство кислорода археями в анаэробной зоне достигает таких масштабов, что часть его попадает в окружающую среду и используется для дыхания подводного животного мира. Доказательством процесса образования кислорода археями в анаэробной среде из воды в наше время являются следующие факторы: биологически инертен метан в отсутствии кислорода; изотопный состав кислорода из карбонатных построек³; наличие аэробных метанотрофов в придонной воде и бактериальных обрастаниях карбонатных построек на глубинах 500–800 м в сероводородной зоне Черного моря⁴; содержание кислорода в отдельных пробах из придонного слоя у дна на глубинах от 800 м до 2000 м в сероводородной зоне Черного моря⁵; наличие бурых гидроокислов железа по трещинам в образцах горных пород, поднятых из сероводородной зоны Черного моря с глубины 1700 м³; сростки кристаллов арагонита, целестина, гипса, барита и кальцита в поверхностных донных отложениях котловины Черного моря (устное сообщение Н.Г. Сергеевой о результатах изучения минералогии донных отложений в институте Южморгеология); наличие в жабрах моллюсков и крабов из оазисов срединных океанических хребтов, архей-симбиотов⁶; присутствие крупной фауны около гидротермальных источников в анаэробной среде метана и сероводорода; покрытие охристой пленкой (окисление сульфидов железа), остывших частей сульфидных труб черных курильщиков⁷.

Долгое время считалось, что в Черном море глубже двухсот метров отсутствует кислород и жизнь, но в 1987 году на единичной станции в пробах воды был обнаружен кислород⁸. Дальнейшие работы по опробованию водной толщи Черного моря показали, что кислород отсутствует в самой водной толще, но его концентрации неоднократно отмечаются в отдельных точках взятия проб из придонных слоев на глубинах до двух километров². Мощность кислородсодержащего слоя у дна не превышает нескольких метров. Имеются данные содержания кислорода на дне в западной и восточной частях котловины на удалении сотен километров от берега². Большинство работ по опробованию производились в районах глубоководных каньонов продолжения рек Днепр, Дунай и Кызыл-Ирмам, где в зонах крупных разломов активно происходят процессы дегазации углеводородов. Исследователи предположили, что содержание кислорода связано с поступлением на дно значительной массы «тяжелой» речной воды, насыщенной терригенной взвесью⁸. Авторы статьи ставят под сомнение предположение о том, что легкая пресная вода слоем около десяти метров по довольно сложному геоморфологическому профилю рельефа прорвется до глубины двух тысяч метров не изменив свою соленость и газонасыщенность. Существуют точки зрения, что наличие кислорода в точках взятия проб связано с разгрузкой субмаринных источников или это выходы подруслового глубинного стока. Но они не подтверждаются данными опробования, геологическим строением шельфовой зоны и результатами изучения геохимического состава подземных вод глубоких горизонтов Предгорного Крыма и других регионов. В местах выходов легких субмаринных вод обогащенных кислородом в глубоководной котловине должны существовать зоны вертикальной циркуляции с изменением солености, газонасыщенности и других геохимических показателей. Такие факты при изучении циркуляции Черного моря не известны. По нашему предположению, выявленные аномальные концентрации кислорода в придонном слое котловины Черного моря связаны с жизнедеятельностью архей. Кислородные зоны контролируются процессами углеводородной дегазации недр, наличием бактериальных матов вокруг них и имеют небольшие размеры. Археи, для которых кислород является побочным продуктом, создают аэробные условия жизни вокруг. Сходным образом могут сформироваться аэробные зоны в бактериальных матах карбонатных построек. В настоящее время, на больших глубинах в сероводородной зоне бактериальных матов найдены аэробные метанотрофные бактерии⁹, но здесь должны встречаться более сложные организмы подводной фауны, использующие для дыхания кислород.

За период наблюдения дегазация в бухте Ласпи носит относительно спокойный характер. Определенная

¹ Brooks J.M., Konnicut M.C., Fisher C.R., Macro S.A. (1987). Deep-sea hydrocarbon seep communities. Evidence for energy and nutritional carbon sources. *Science* 238: P. 1138 – 1142; Konnicut II M. C., Books J.M., Bidigare R.R.(1985). Venttyre taxa in hydrocarbon seep region on the Louisiana slope. *Nature*. 317. P. 351–355.

² Векилов Э.Х. О процессах биологической ассимиляции углеродных продуктов в морской среде на примере Каспийского моря // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2002. С. 316–318.

³ Шнюков Е.Ф., Щербаков Е.Е., Шнюкова Е.Е. Указ. соч..

⁴ Гальченко В.Ф. Метанотрофные бактерии. М.: ГЕОС, 2001. 500 с.

⁵ Троцюк В.Я., Берлин Ю.М., Большаков А.М. Кислород в придонных водах Черного моря // ДАН. 1988. Т. 302. № 4. С. 961–964.

⁶ Лисицин А.П., Богданов Ю.А., Зоненшайн Л.П. и др. Гидротермальные проявления Срединно-Атлантического хребта на 26° с.ш. (Гидротермальное поле ТАГ) // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 12. С. 3–18.

⁷ Там же.

⁸ Троцюк В.Я., Берлин Ю.М., Большаков А.М. Указ. соч.

⁹ Гальченко В.Ф. Указ. соч.

часть выбросов газа, перерабатывается в органическое вещество и карбонат. Можно предположить, что кроме спокойной разгрузки, возможен кратковременный взрывной характер дегазации. Объем такого извержения по результатам изучения грязевого вулканизма, может превышать в тысячи раз масштабы его переработки и приводить к «местной» экологической катастрофе. Компонентами газа являются метан, сероводород и углекислый газ, поэтому в морской акватории происходит нарушение кислородного баланса. Возможно, с этим связаны заморы рыбы у побережья, о которых рассказывали местные рыбаки. Крупный выброс газа в тридцатых годах девятнадцатого века описан в записках известного французского путешественника Фредерика Дюбуа де Монпере. О «столбе дыма, внезапно появившегося посередине бухты Ласпи», ему рассказал управляющий ласпинским имением Ш. Компер¹.

На сегодняшний день отсутствуют систематические наблюдения за объемами выбросов и составом газовых струй холодной дегазации на дне и побережье Черного моря за длительный период времени и не прослежена связь этих явлений с сейсмической активностью. В тоже время результатами наблюдений за поверхностным грязевым вулканизмом и дегазацией на дне Охотского моря доказана связь между дегазацией и углеводородов и тектонической активностью. Можно предположить, что современная активность выходов газов в бухте Ласпи, связана с сейсмическими процессами на Форосском поднятие. Газовые струи дегазации являются индикаторами состояния недр. Южный берег Крыма относится к восьмибальной сейсмической зоне. Современная традиционная сейсмология и геофизика не сумела сделать прогноз катастрофического землетрясения в Японии. Многие ученые высказали предположение, что сейсмический мониторинг не отражает все разнообразие глубинных процессов в земной коре и является недостаточным для прогноза. Поэтому желательно создать сеть станций слежения вдоль южного берега Крыма (в том числе и в бухте Ласпи) для систематических наблюдений за газовыми и гидрохимическими параметрами прибрежных зон дегазации. Результаты таких наблюдений, учитывая связь газовой проницаемости с деформационным напряжением пород, могут служить дополнительной информацией об изменениях напряжений в массивах горных пород земной коры.

В заключении следует отметить, что карбонатная постройка в подводной части пляжной зоны бухты Ласпи является уникальным геолого-биологическим объектом и требует дополнительных исследований. Ее образование, как и подобных построек на шельфе и континентальном склоне Черного моря, происходило в зоне соприкосновения и взаимодействия литосферы, гидросферы, атмосферы (пузырьки газа) и биосферы. Общим для них является образование карбонатного вещества в местах дегазации метана, при наличии бактериальных матов с метанотрофными археями. Различный внешний вид карбонатных построек связан с физико-географическими условиями их формирования. Кроме разной внешней формы, возможно, они будут характеризоваться разным изотопным составом углеводорода и геохимией. Это объясняется образованием карбонатного цемента построек пляжной зоны бухты Ласпи в кислородной среде, а карбонатных матов и труб на больших глубинах в восстановительных условиях сероводородной зоны.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Арсланов Х.А. Радиоуглерод: Геохимия и геохронология. Л.: ЛГУ, 1987. 300 с.
Arslanov Kh.A. (1987). Radiouglerod: Geokhimiya i geokhronologiya. LGU, Leningrad. 300 p.
- 2 Векилов Э.Х. О процессах биологической ассимиляции углеродных продуктов в морской среде на примере Каспийского моря // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2002. С. 316–318.
Vekilov E.Kh. (2002). O protsessakh biologicheskoi assimilyatsii uglerodnykh produktov v morskoi srede na primere Kaspiiskogo moray. In: Degazatsiya Zemli i genezis uglevodorodnykh flyuidov i mestorozhdenii. GEOS, Moskva. Pp. 316–318.
- 3 Гальченко В.Ф. Метанотрофные бактерии. М.: ГЕОС, 2001. 500 с.
Gal'chenko V.F. (2001). Metanotrofnye bakterii. GEOS, Moskva. 500 p.
- 4 Геворкьян В. Х., Бураков В. И., Исагулова Ю. К. и др. Газовыделяющие постройки на дне северо-западной части Черного моря // Докл. АН УССР. 1991. № 4. С. 80–85.
Gevork'yan V. Kh., Burakov V. I., Isagulova Yu. K. i dr. (1991). Gazovydelyayushchie postroiiki na dne severo-zapadnoi chasti Chernogo moray. Dokl. AN USSR. N 4. Pp. 80–85.
- 5 Дюбуа де Монпере Ф. Путешествие в Крым. Симферополь: «Бизнес-Информ», 2009. 326 с.
Dyubua de Monpere F. (2009). Puteshestvie v Krym. «Biznes-Inform», Simferopol'. 326 p.
- 6 Костова С. К., Поповичев В. Н., Егоров В. Н. и др. Распределения ртути в воде и донных отложениях в местах локализации струйных метановых газовыделений со дна Черного моря // Морський екологічний журнал. 2006 Т. 5. № 2. С. 47–55.
Kostova S. K., Popovichev V. N., Egorov V. N. i dr. (2006). Raspredeleniya rtuti v vode i donnykh otlozheniyakh v mestakh lokalizatsii struinykh metanovykh gazovydelenii so dna Chernogo moraya. Mors'kii ekologichnii zhurnal. T. 5. N 2. Pp. 47–55.
- 7 Крылов А.А. Хлыстов О. М., Земская Т. И. и др. Формирование аутигенных карбонатов в грязевых вулканах озера Байкал // Геохимия. 2008. № 10. С. 1051–1062.
Krylov A.A. Khlystov O. M., Zemskaya T. I. i dr. (2008). Formirovanie autigennykh karbonatov v gryazevykh vulkanakh ozera Baikal. Geokhimiya. N 10. Pp. 1051–1062.
- 8 Кутас Р. И. Геотермические условия зон газовыделения и грязевого вулканизма в Черном море // Геология морей и океанов. М., 2007. Т. 4. С. 108–110.
Kutas R. I. (2007). Geotermicheskie usloviya zon gazovydeleniya i gryazevogo vulkanizma v Chernom more. In: Geologiya morei i okeanov. Moskva. 2007. T. 4. Pp. 108–110.
- 9 Леин А.Ю. Жизнь на сероводороде и метане // Природа. 2005. № 12. С. 1–14.
Lein A.Yu. (2005). Zhizn' na serovodorode i metane. Priroda. N 12. Pp. 1–14.
- 10 Леин А.Ю., Гальченко В.В., Покровский Б.Г. и др. Морские карбонатные конкреции как результат процессов микробного окисления газогидратного метана в Охотском море // Геохимия. 1989. № 10. С. 1396–1406.

¹ Дюбуа де Монпере Ф. Путешествие в Крым. Симферополь: «Бизнес-Информ», 2009. 326 с.

- Lein A.Yu., Gal'chenko V.V., Pokrovskii B.G. i dr. (1989). Morskie karbonatnye konkretii kak rezul'tat protsessov mikrobnogo okisleniya gazogidratnogo metana v Okhotskom more. *Geokhimiya*. N 10. Pp. 1396–1406.
- 11 Леин А.Ю., Пименов Н.В., Саввичев А.С. и др. Метан как источник органического вещества и углекислоты карбонатов на холодном сипе в Норвежском море // *Геохимия*. 2000. № 3. С. 268–281.
Lein A.Yu., Pimenov N.V., Savvichev A.S. i dr. (2000). Metan kak istochnik organicheskogo veshchestva i uglekisloty karbonatov na kholodnom sipe v Norvezhskom more. *Geokhimiya*. N 3. Pp. 268–281.
 - 12 Лисицин А.П., Богданов Ю.А., Зоненшайн Л.П. и др. Гидротермальные проявления Срединно-Атлантического хребта на 26° с.ш. (Гидротермальное поле ТАГ) // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1989. № 12. С. 3–18.
Lisitsin A. P., Bogdanov Yu. A., Zonenshain L.P. i dr. (1989). Gidrotermal'nye proyavleniya Sredinno-Atlanticheskogo khrebta na 26° s.sh. (Gidrotermal'noe pole TAG). *Izv. ANSSSR. Ser. geol.* N 12. Pp. 3–18.
 - 13 Лущик А.В., Морозов В.И., Палин В.П. и др. Особенности формирования подземных вод в западной части Равнинного Крыма (на примере района бухты Очеретай) // *Геол. журн.* 1985. Т. 45. № 3. С. 101–107.
Lushchik A.V., Morozov V.I., Palin V.P. i dr. (1985). Osobennosti formirovaniya podzemnykh vod v zapadnoi chasti Ravninnogo Kryma (na primere raiona bukhty Ocheretai). *Geol. zhurn.* T. 45. N 3. Pp. 101–107.
 - 14 Николаев С.Д., Свиточ А.А. Ядерные методы абсолютной геохронологии // *Методы палеогеографических реконструкций*. М.: МГУ, 2010. С. 332–342.
Nikolaev S.D., Svitoch A.A. (2010). Yadernye metody absolyutnoi geokhronologii. In: *Metody paleogeograficheskikh rekonstruktsii*. MGU, Moskva. Pp 332–342.
 - 15 Пименов Н.В., Русанов И.И., Поглазова М.Н. и др. бактериальные обрастания на кораллоподобных постройках в местах выхода метановых газовых выделений в Черном море // *Микробиология*. 1997. № 6. С. 7–14.
Pimenov N.V., Rusanov I.I., Poglazova M.N. i dr. (1997). bakterial'nye obrastaniya na korallovidnykh postroikakh v mestakh vykhoda metanovykh gazovykh vydeleniy v Chernom more. *Mikrobiologiya*. N 6. Pp. 7–14.
 - 16 Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Нежданов А.И. и др. Явление активного газовыделения из поднятий на свале глубин западной части Черного моря // *Докл. АН УССР*. 1989. № 12. С. 13–16.
Polikarpov G.G., Egorov V.N., Nezhdanov A.I. i dr. (1989). Yavlenie aktivnogo gazovydeniya iz podnyatii na svale glubin zapadnoi chasti Chernogo moray. *Dokl. AN USSR*. N 12. Pp. 13–16.
 - 17 Розанов А.Ю., Заварзин Г.А. бактериальная палеонтология // *Вестник РАН*. 1997. Т. 67. № 3. С. 241–245.
Rozanov A.Yu., Zavarzin G.A. (1997). bakterial'naya paleontologiya. *Vestnik RAN*. T. 67. N 3. Pp. 241–245.
 - 18 Рязанов А.К. Газ и газовые туманы на шельфе Черного моря // *Докл. АН УССР*. 1996. № 4. С. 90–94.
Ryazanov A.K. (1996). Gaz i gazovye tumany na shel'fe Chernogo morya. *Dokl. AN USSR*. N 4. Pp. 90–94.
 - 19 Ткешелашвили Г.И., Егоров В.Н., Мествиришвили Ш.А. и др. Метановые газовыделения со дна Черного моря в приустьевой зоне реки Супса у побережья Грузии // *Геохимия*. 1997. № 3. С. 331–335.
Tkeshelashvili G.I., Egorov V.N., Mestvirishvili Sh.A. i dr. (1997). Metanovye gazovydeniya so dna Chernogo morya v priust'evoi zone reki Supsa u poberezh'ya Gruzii. *Geokhimiya*. N 3. Pp. 331–335.
 - 20 Троцюк В.Я., Берлин Ю.М., Большаков А. М. Кислород в придонных водах Черного моря // *ДАН*. 1988. Т. 302. № 4. С. 961–964.
Trotsyuk V.Ya., Berlin Yu.M., Bol'shakov A.M. (1988). Kislorod v pridonnykh vodakh Chernogo moray. *DAN*. T. 302. N 4. Pp. 961–964.
 - 21 Тюрин А.М. Три постулата радиоуглеродного датирования // *Сборник статей по новой хронологии*. 2009. Вып. 8. С. 1–7.
Tyurin A.M. (2009). Tri postulata radiouglerodnogo datirovaniya. In: *Sbornik statei po novoi khronologii*. 2009. Vyp. 8. Pp. 1–7.
 - 22 Черняк Н.И., Богаец А.Т., Плахотный Л.Г. и др. Нефтегазность // *Геология СССР*. Т. 8. М.: Недра, 1974. С. 64–66.
Chernyak N.I., Bogaets A.T., Plakhotnyi L.G. i dr. (1974). Neftegaznostnost'. In: *Geologiya SSSR*. T. 8. Nedra, Moskva. Pp. 64–66.
 - 23 Шик Н.В. Газовые выделения на дне бухты Ласпи // *Геология и полезные ископаемые мирового океана*. 2006. № 1. С. 135–136.
Shik N.V. (2006). Gazovye vydeleniya na dne bukhty Laspi. *Geologiya i poleznye iskoopaemye mirovogo okeana*. N 1. Pp. 135–136.
 - 24 Шнюков Е.Ф., Гнатенко Г.И., Нестеровский В.А. и др. Грязевой вулканизм Керченско-Таманского региона. Киев: Наук. думка, 1992. 199 с.
Shnyukov E.F., Gnatenko G.I., Nesterovskii V.A. i dr. (1992). Gryazevoi vulkanizm Kerchensko-Tamanskogo regiona. Kiev: Nauk. dumka, 199 p.
 - 25 Шнюков Е.Ф., Щербачев Е.Е., Шнюкова Е.Е. Палеоостровная дуга севера Черного моря. Киев, 1997. 287 с.
Shnyukov E.F., Shcherbakov E.E., Shnyukova E.E. (1997). Paleostrovnaya duga severa Chernogo morya. Kiev. 287 p.
 - 26 Brooks J.M., Konnicut M., Fisher C.R., Macro S.A. (1987) Deep-sea hydrocarbon seep communities/ Evidence for energy and nutritional carbon sources. *Science*. 238: P. 1138–1142.
 - 27 Holzner C.P., McGinnis D.F., Schubert C.J. (2008). Noble gas anomalies related to high-intensity methane gas seeps in the Black Sea. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 256. N 3/4. P. 396–409.
 - 28 Konnicut II M.C., Books J.M., Bidigare R.R. (1985). Ventyre taxa in hydrocarbon seep region on the Louisiana slope. *Nature*. 317. P. 351–355.

УДК 553.63:553.776(267.33)



Беленицкая Г.А.

Мертвое море: геология, происхождение, мифы

Часть 1. «Соленосное чудо» планеты¹

Беленицкая Галина Александровна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ).

E-mail: Galina_Belenitskaya@vsegei.ru, ankudinovo@mail.ru

Некоторые необычные особенности Мертвого моря и связанные с ними загадки и легенды автор рассмотрел с позиций геолога, занимающегося проблемами солей и связанного с ними разнообразного природного «соляного сообщества», с учетом установленных закономерностей строения и формирования «соляного сообщества», своеобразия его динамических и морфологических природных проявлений. Предложено авторское видение их генетической природы, возможных причин, условий образования, специфики проявлений. В части 1 автор обсудил ключевые черты геологии соленосной структуры Мертвого моря (структурно-тектоническая ситуация, соленосность недр и их флюидодинамическая напряженность), охарактеризовал разнообразные специфические особенности Мертвого моря, многие из которых отражены в его названиях.

Ключевые слова: Мертвое море, соли, рассолы, соляные диапиры, флюидодинамика, очаг разгрузки, происхождение солей и рассолов, уровни рассолов, «содомская катастрофа», Левантский сдвиг, Синайско-Пальмирская палеорифтовая зона.

Это наиболее поражающий провал в земной коре, выполненный самым мощным слоем высококонцентрированных рассолов.

Виллис Бейли²

Введение

Соли Земли. Недра Земли чрезвычайно богаты солями и рассолами. Соленосные осадочные бассейны, т.е. осадочно-породные бассейны, вмещающие мощные толщи солей, широко распространены в стратифере – в пределах всех континентов, морей, океанических окраин, отсутствуя лишь на абиссальных пространствах собственно океанов. Соленосна почти половина (более 110) всех относительно крупных осадочных бассейнов мира. По масштабам соленосности среди них резко выделяются около 20 гигантов, каждый из которых содержит свыше 100 тыс. км³ солей каждый, из них 14 – свыше 500 тыс. км³. Четыре супергиганта – Прикаспийский, Мексиканского залива, Восточно-Сибирский и Средиземноморский – вмещают массы солей порядка 1,5–2,5 млн. км³. Общий же объем солей во всех крупных бассейнах близок к 25 млн. куб. км³. Близок и порядок объемов связанных с ними высококонцентрированных подземных рассолов. А еще примерно такая же масса солей находится в водной оболочке Земли – в водах (рассолах) Мирового океана. Так что, пожалуй, не будет ошибкой назвать и саму нашу Землю «Планетой солей».

Мир природных солей разнообразен. Это и собственно соли – каменная (галит, NaCl), тесно ассоциирующие с ней калийно-магниевые и некоторые более редкие, а также их многочисленные спутники – бром, бор, сера самородная, высококонцентрированные рассолы (вплоть до сверхкрепких – до 500–600 г/л и более), а еще углеводородные газы, нефти, конденсаты, сероводород (и в рассолах и в газах). Все эти столь разные геологические образования, локализуясь вокруг солей, составляют взаимосвязанное природное «галофильное» (солелюбивое: *гало* – соль, *фил* – любить) сообщество⁴.

Характерная и очень важная черта многих соленосных бассейнов – осложненность солянокупольной тектоники. Более половины крупных соленосных бассейнов мира (а среди крупнейших – подавляющее большинство) на преобладающей части площади осложнены интенсивной солянокупольной тектоникой и именуются солянокупольными. В солянокупольных структурах заключено не менее 50–60% всей массы солей. Особенно масштабно и разнообразно соли, а вместе с ними и все другие представители соляного сообщества, распространены в гигантском

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 10-05-00555а, 12-05-00513-Д-с.

² Бейли В. Проблема Мертвого моря (рифтовая или рамповая долина). Пер. с англ. / Под ред. Н.С. Шатского. Л.: НКТП. 1934. 56 с.

³ Беленицкая Г.А. Соляная тектоника // Энциклопедический справочник «Планета Земля» / Гл. ред. Л.И. Красный. Т. 2: Тектоника и геодинамика. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2004. С. 354–375; Она же. Природные соляно-нафтидные узлы – глобальные центры надежд и угроз (на примере бассейна Мексиканского залива) // Пространство и Время. 2012. № 3(9). С. 193–207.

⁴ Беленицкая Г.А. Галогенсодержащие бассейны // Литогеодиника и минерагения осадочных бассейнов / Под ред. А.Д. Щеглова. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. С. 220–320; Она же. Соленосные осадочные бассейны. Литолого-фациальный, геодинамический и минерагенический анализ. Осадочные бассейны России. Вып. 4. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000, 72 с.

Средиземноморском соляном суперпоясе, контролируемом двумя молодыми неогеодиническими трансконтинентальными поясами – субширотным Средиземноморско-Альпийским коллизионным и субмеридиональным Афро-Аравийским внутри-межконтинентально-рифтовым. Оба в целом наследуют более древние геодинические и соленосные палеопояса. В пределах этих двух поясов, максимально в области их пересечения, сосредоточены солянокупольные гиганты и супергиганты: Западно- и Восточно-Средиземноморские, Персидского залива, Суэцко-Красноморский и ряд более мелких – Мертвого моря, Пальмирский, Данакильский и др. Вместе эти бассейны (кроме смежного с ними Западно-Средиземноморского) образуют своеобразное Циркумаравийское соляное кольцо, связанное с окраинами малой Аравийской плиты, с ее деструкцией, перемещениями, столкновениями (рис. 1). Каждый из бассейнов характеризуется широчайшим распространением всех представителей соляного сообщества – и глубоко в недрах, и в составе восходящих разгрузок, и в разнообразных поверхностных проявлениях.

Соленосный (и солянокупольный) бассейн грабена Мертвого моря, которому посвящено данное сообщение, составляет лишь небольшой по площади участок Циркумаравийского соляного¹ кольца. Большая часть его поверхности погружена под рассолы Мертвого моря (озера), уровень которого находится на максимальных для открытых водоемов глубинах – более чем на 400 м ниже уровня океана. Будучи по площади самым «маленьким» солянокупольным бассейном Средиземноморского пояса, он представляет собой, вместе с тем, весьма мощный нафто-рассольно-соляной «узел». Его по праву можно отнести к числу наиболее интересных и интригующих солянокупольных объектов мира – средоточию множества загадок, легенд и тайн – научных, культурных, житейских, библейских. Не случайно это «соленосное чудо» вошло в число 14-ти финалистов международного интернет-голосования при выборе семи чудес природы (nauka21vek.ru, 23.11.2010).

В проблеме природы соленосности Мертвого моря можно выделить два взаимосвязанных аспекта. Один – генезис его знаменитых поверхностных рассолов, второй – происхождение и условия образования мощных соляных масс, выполняющих грабен и образующих рассолоносную «чашу» – ее дно и борта. Хотя оба аспекта в разной мере освещены в геологической литературе, многие вопросы остаются не решенными или спорными, допуская возможность иных интерпретаций.

В статье мы попытаемся взглянуть на некоторые необычные, хотя в своем большинстве широко известные особенности Мертвого моря, на тайны его происхождения и жизни глазами геолога, долгие годы занимавшего проблемами солей и соляных парагенезов – породных и рудных, твердых, жидких и газообразных². Общая цель статьи – обсудить эти особенности и связанные с ними загадки и легенды Мертвого моря с позиций уже установленных закономерностей строения и формирования «соляного сообщества», своеобразия его химических, кинетических и морфологических природных проявлений, а также предложить свое видение их генетической природы, возможных причин и условий образования.

Первая часть посвящена вопросам геологического строения, флюидодинамики грабеновой структуры Мертвого моря и описанию знаменитых «необычных» особенностей рассольного водоема. Вторая – проблемам генезиса и истории развития солей, диапиров и рассолов Мертвого моря. В третьей части мы рассмотрим разнообразные проявления активной жизни рассольно-соляных недр и их отражение в поверхностной геологической среде, а также в мифах и легендах.

Ключевые черты геологии и флюидодинамики грабена Мертвого моря

Структурно-тектоническая ситуация. Соленосный бассейн Мертвого моря, локализованный в одноименном глубочайшем грабене, представляет собой мощное тектонически ограниченное тело, заполняющее этот грабен и почти целиком погруженное под рассолы Мертвого моря (рис. 2). Тектоническая природа и происхождение структуры Мертвого моря и его глубоководной рассолоносной впадины долгие годы составляли суть «проблемы Мертвого моря»³. И хотя в настоящее время решение многих вопросов в целом как будто найдено, интерес к проблеме не ослабевает. Главные черты строения и эволюции структуры Мертвого моря ныне рисуются следующим образом⁴.

Заложение, развитие и выполнение грабеновой структуры связано с взаимодействием двух крупнейших структурно-тектонических зон, на пересечении которых она находится (рис. 3). Одна, субмеридиональная – сдвиговая Левантская (другие ее наименования – Левантийская, Сирийско-Африканская, Мертвого моря и др.) – представляет северный отрезок молодой трансконтинентальной Афро-Аравийской рифтовой системы. Вторая, общего северо-восточного простирания – Северо-Синайско-Пальмирская внутриплитная палеорифтогенная (авлакогенная) складчатая, состоит из двух ветвей, разделенных и разъединенных Левантским сдвигом: юго-западной – Северо-Синайской, и северо-восточной – Пальмирской, смещенной по сдвигу относительно первой более чем на 100 км к северу.

Структура Мертвого моря, являясь элементом Левантской сдвиговой зоны, целиком локализуется в одном из ее

¹ Беленицкая Г.А. Минералогия соленосных бассейнов мира // Энциклопедический справочник «Планета Земля». Гл. ред. Л.И. Красный. Т. 1: Минералогия. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2008. Кн. 1. С. 165–189.

² Бейли В. Указ. соч.

³ Там же.

⁴ Neev D., Emery K.O. The Dead Sea depositional processes and environments of evaporates. Jerusalem. 1967. 148 p.; Bentor Y.K. Salt deposits of the Dead Sea region. The Geological Soc. of America. Spec. Paper. 1968. Pp. 139–156; Пикар Л. Некоторые соображения о системе грабенов Леванта // Система рифтов Земли. Пер. с англ. М.: Мир. 1970. С. 26–34; Atlas of Israel: cartography, physical geography, human and economic geography, history. Jerusalem: Survey of Israel, Ministry of Labor and Amsterdam, Elsevier. (English). 1970; Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Вып. 1. Северная и Южная Америка, Антарктида и Африка. М., Недра. 1971. 548 с.; Zak I., Bentor Y.K. Same new data on the salt deposits of the Dead Sea area, Israel. UNESCO, 1972. Geol. of saline deposits. Proc. Hanover Symp., 1968. (Earth sciences, 7). Pp. 137–144; The Dead Sea Rift. Eds. R. Freundt, Z. Garfunkel. Tectonophysics. Special issue. Vol. 80. N 1–4. 1981. 307 p.; Милановский Е.Е. Рифтогенез в истории Земли. Рифтогенез на древних платформах. М.: Недра, 1987. 280 с.; Обстановки осадконакопления и фауны / Под ред. Х.Реддинга. М.: Мир, 1990. Т. 1. 351 с. Т. 2. 381 с.; Копп М.Л., Леонов Ю.Г., Аджамян Ж. Деформации запада Аравийской плиты как результат сдвиговых перемещений по Левантскому разлому // Геотектоника. 1994. № 3. С. 52–65; Tectonics of Sedimentary Basins: From Crustal Structure to Basin Fill. Tectonophysics. Vol. 346. N 1–2. 2002. 180 p.; Трифонов В.Г., Караханян А.С. Геодиника и история цивилизаций / Отв. ред. Ю.Г. Леонов. М.: Наука. 2004. 665 с.; Лунина О.В. Разрывные системы и поля напряжений южной части рифта Мертвого моря. Геотектоника. 2005. № 2. С. 52–65; и др.

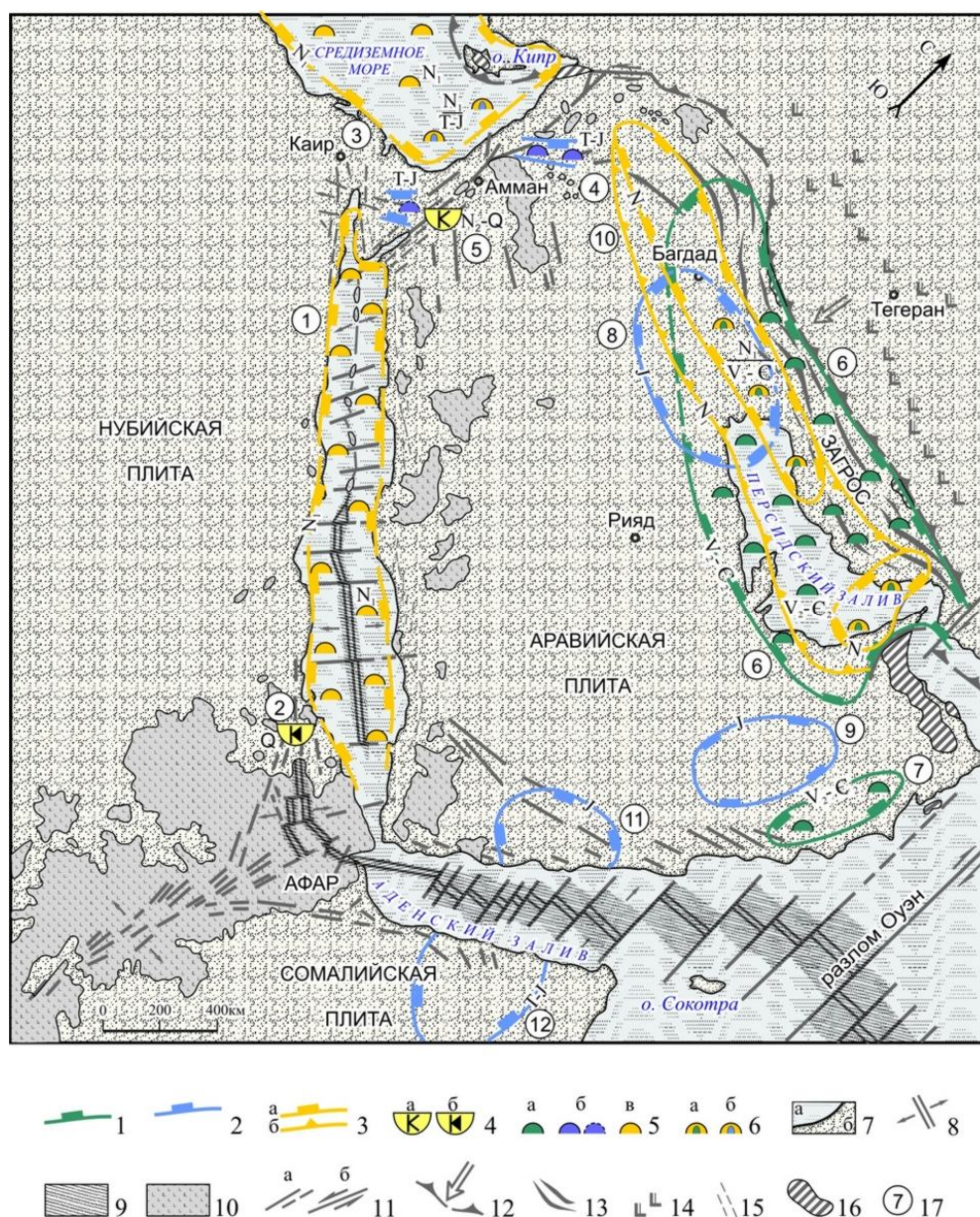


Рис. 1. Солёные осадочные бассейны Циркумаравийского солёного кольца. Составила Г.А. Беле-ницкая. Структурно-тектоническая основа по Колману¹.

1-3 — границы распространения солёных бассейнов (короткий пунктир — перекрытых более молодыми солёными бассейнами или предполагаемых, длинный — обобщающие контуры): 1 — венд-кембрийских, V₂-Є₂, 2 — триасово-юрских, Т-Ј и верхнеюрских, Ј₃, 3 — миоценовых, N₁ (а — галитовых, б — сульфатно-кальциевых); 4 — солёные бассейны, показанные вне масштаба: а — Мертвого моря, хлоридно-кальевого типа, б — Данакильский, сульфатно-кальевого типа; 5 — области распространения солей, осложнённых солянокупольной тектоникой (пунктирный значок — вероятное распространение): а — венд-кембрийских, V₂-Є₂, б — триасово-юрских, Т-Ј и верхнеюрских, Ј₃, в — миоценовых, N₁; 6 — то же, при сочетании в разрезе разновозрастных солей с образованием двусолевых диапиров; 7 — современные акватории (а) и суши (б); 8 — современные активные центры спрединга (стрелки — направление спрединга); 9 — районы новообразованной океанической коры; 10 — поля вулканических пород; 11 — крупные нарушения (а) и направления смещений (б); 12 — крупные надвиги (стрелка — главное направление смещений); 13 — складчатый пояс Загроса; 14 — позднегеретичные известково-щелочные вулканические породы, связанные с субдукцией Аравийской плиты под Евразийскую; 15 — дайковые пояса; 16 — офиолиты; 17 (цифры в кружках) — солёные бассейны (в скобках — возраст солей): 1 — Красноморский (N₁), 2 — Данакильский (Q), 3 — Восточно-Средиземноморский (N₁, Т₃-Ј₁), 4 — Северо-Синайско-Пальмиридский (Т₃Ј₃?), 5 — Мертвого моря (N₂-Q), 6 — Персидско-Загросский (V₂-Є₂), 7 — Восточно-Аравийский (V₂-Є₂), 8 — Северо-Аравийский (Ј₃), 9 — Восточно-Аравийский (Ј₃), 10 — Месопотамский (N₁), 11 — Сабатайн (Ј₃), 12 — Сомали-Эфиопский (Т-Ј).

¹ Колман Р. Красное море: малый океанический бассейн, образованный континентальным растяжением и спредингом морского дна // Докл. 27 МГК. М. 1984. Т. 6. Ч. II. С. 58-73.

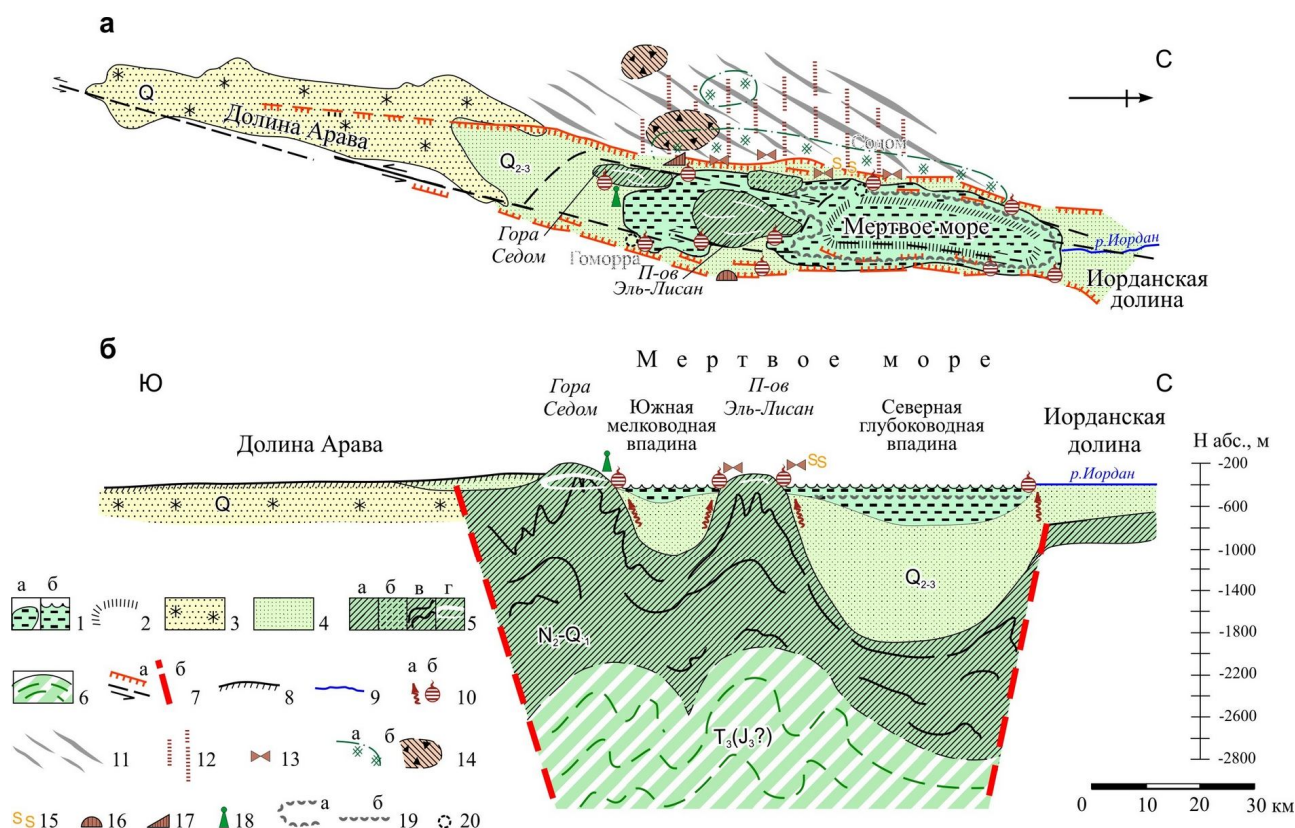


Рис. 2. Схематические план (а) и продольный разрез (б) соленосного бассейна Мертвого моря. Составила Г.А. Беленицкая¹.

1 – высококонцентрированные рассолы Мертвого моря: а – на плане, б – на разрезе; 2 – контуры глубоководной впадины Мертвого моря (на плане); 3 – аллювиальные терригенные красноцветные отложения с подчиненным количеством озерных карбонатов (Q); 4 – озерные карбонатные и терригенные отложения с подчиненным количеством гипсов, ангидритов и каменной соли, свиты Амора и Лисан (Q_{2-3}); 5 – каменная соль с подчиненным количеством гипсов, ангидритов, карбонатных и глинистых пород, свита Седом (N_2-Q_1): а, б – на плане (а – в открытых диапирах, б – в погребенных, установленных по геофизическим данным), в – на разрезе, г – карстовые системы в кепроках; 6 – вероятное распространение каменной соли $T_3(J_3?)$ в погребенных диапирах (на разрезе); 7 – крупные тектонические нарушения (ограничения щелевого грабена Мертвого моря): а – на плане, б – на разрезе; 8 – поверхность Земли (на разрезе); 9 – река Иордан; 10 – восходящие потоки горячих рассолов с углеводородами и сероводородом (а) и очаги их разгрузки (б); 11 – основные структурные направления Северо-Синайской складчатой зоны, срезанные разломом, ограничивающим грабен Мертвого моря; 12 – область, перспективная на скопления углеводородов в отложениях Северо-Синайской зоны; 13 – область распространения приповерхностных проявлений нефтяных битумов («высачивания», смоляные ямы, древние разработки и др.); 14 – области наиболее значительного распространения в западном обрамлении грабена Мертвого моря²: а – плио-плейстоценовой наложенной галофильной минерализации (жилы галита, гипса, доломитизация и др.), б – плиоценового комплекса измененных грязевулканических («сопочных») брекчий (формации Хатрурим); 15 – предполагаемые древние разработки серы самородной; 16, 17 – проекции на поверхность скоплений углеводородов в отложениях мезозоя (16) и залежей верхнемеловых горячих сланцев (17); 18 – соляная столб «Жена Лота» (одно из положений, приводимых в путеводителе по Израилу); 19 – предполагаемое положение перед «Содомской катастрофой»: а – береговой линии Мертвого моря (на плане), б – уровня рассолов (на разрезе); 20 – вероятное положение городов Содом и Гоморра³.

¹ Моделировано по: Zak I., Bentor Y.K. Op. cit.; Обстановки осадконакопления и фации ...; с дополнениями по: Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Вып. 4. Альпийский Средиземноморский пояс. М.: Недра. 1984. 344 с.; Khesin B. Mineral resources of Israel and possibilities of their geophysical prospecting. Scientific issues of "Scientists of the South Association". 2005. Iss. 4. Pp. 3–18; Верба М.И. Библийские легенды глазами геолога: Исторические и геологические свидетельства современного рифтогенеза. СПб.: Наука. 2008. 175 с.; Хаин В.Е., Короновский Н.В. Геомифология – новое направление в науке // Природа. 2009. № 4. С. 9–17; Gilat A. Hydrothermal activity and hydro-explosions as a cause of natural combustion and pyrolysis of bituminous rocks: the case of Pliocene metamorphism in Israel (Hatrurim formation). Geol. Surv. Israel. Curr. Res. 1998. Vol. 11. Pp. 96–102; Гилат А. Содом и Гоморра: гидротермальные взрывы и самовозгорание горячих газов, вызванные землетрясением? // Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды, нефть и газ; углеводороды и жизнь. М.: ГЕОС, 2010. С. 112–114; и др.

² Gilat A. Op. cit.; Сокол Э.В., Новиков И.С., Вапник Е., Шарыгин В.В. Горение газов грязевых вулканов как причина возникновения высокотемпературных пирометаморфических пород формации Хатрурим (район Мертвого моря) // ДАН. 2007. Т. 413. № 6. С. 803–809.

³ Хаин В.Е., Короновский Н.В. Указ. соч.

наиболее значительных осложнений – в глубоком (до 8–10 км) ромбовидном грабене, отвечающем щелевидной структуре сдвига-раздвигового (pull-apart) типа, длиной до 200 км и шириной до 10–15 км. Мертвое море представляет собой классический сдвиговый бассейн¹. Активное дискретное смещение вдоль сдвиговой зоны, начавшись в олигоцене (или ранее), резко усилилось в плио-плейстоцене (при переходе к фазе спрединга в Красноморской рифтовой зоне) и осуществляется поныне. Сдвига-раздвиговая щель, контролирующая грабен Мертвого моря, возникла в позднем плиоцене в месте «разрезания» Левантским сдвигом Северо-Синайско-Пальмирской авлакогенной зоны. Срез юго-западной ветви этой зоны по существу непосредственно «утыкается» в эту щель. Срез же северо-восточной Пальмирской ветви приходится на область преобладания в пределах Левантского сдвига сжимающих напряжений. Роль этой зоны в истории солей Мертвого моря представляется нам чрезвычайно важной, во многом ключевой (хотя до настоящего времени не расшифрованной), поэтому мы ниже уделим ей особое внимание. Здесь лишь отметим, что в пределах северо-восточной Пальмирской ветви хорошо известны и имеют значительное распространение мощные толщи солей верхнетриасового (возможно верхнеюрского) возраста². Сумма геологических данных позволяет нам полагать, что соленосные комплексы того же возраста имеют (или имели в доплиоценовое время) непосредственное продолжение и в юго-западной Северо-Синайской ветви, срезанной грабеном Мертвого моря (рис. 3)

Борта грабена слагают геологические образования разного состава и возраста: западный – в значительной мере осадочные комплексы Северо-Синайской зоны – меловые и эоценовые, подстилаемые юрскими и триасовыми; восточный – преимущественно докембрийские Аравийской плиты³. Восточное тектоническое ограничение оценивается как древняя (возможно, докембрийская) сутура⁴.

Соляные недра грабена Мертвого моря. Грабен выполняют осадочные отложения вероятной мощностью до 8–10 км. В их составе доминируют соли, образующие до 70–80% мощности. Нижние части разреза не изучены. Не исключено, что в их основании присутствует опущенный блок мезозойских пород, аналогичных развитым в Северо-Синайской зоне западного обрамления грабена⁵. Верхнюю часть осадочного заполнения образует мощная (не менее 4–5 км) серия плиоцен-четвертичных соленосных отложений⁶. В их разрезе можно выделить три комплекса. Снизу вверх:

1. Мощная (более 3–4 км в солянокупольных поднятиях) соленосная формация (свита Седом) плиоцен-раннеплейстоценового возраста (N_2-Q_1). Сложена преимущественно каменной солью с подчиненным количеством гипсов, ангидритов, карбонатных и глинистых пород. В солях купола Эль-Лисан в интервале 541–596 м вскрыты пласты калийных (сильвин-карналлитовых) солей с содержанием K_2O 21,7–23,2%⁷.

2. Толща, мощностью 500–1000 м, средне-позднеплейстоценовых (Q_{2-3}) озерных карбонатных и терригенных отложений, с неравномерным, в целом подчиненным, содержанием ангидритов, гипсов, каменной соли (свиты Амора, Лисан и перекрывающие осадки).

3. Голоценовые (Q_4 , 12–15 тыс. лет) хемогенные осадки, мощностью от нескольких до 70 м, распространенные преимущественно в пределах акватории Мертвого моря. Представлены переслаиванием глинистых отложений с пластами арагонита, гипса, галита, образующих линзообразные раздувы. За пределами акватории в грабеновой структуре развиты в основном аллювиальные отложения, представленные существенно терригенным материалом с подчиненным количеством озерных карбонатов и сэхово-лагунных осадков.

Наиболее важный элемент выполнения грабеновой структуры – соли нижней свиты Седом – составляют значительную часть ее объема, слагая дно и борта рассолоносной «чаши». На поверхность Земли они выведены в двух открытых соляных куполах, отвечающих горе Седом (Маунт Сдом) и п-ову Эль-Лисан (рис. 2). Первый из них, возвышаясь на 200–220 м над современным уровнем Мертвого моря, на глубине образует вытянутое стено-(дайко)подобное соляное тело (длиной около 10 км, шириной 1–2 км, высотой более 3–4 км), прижатое к западному ступенчатому тектоническому ограничению грабена. Западный и восточный склоны тела крутые. В его приповерхностной зоне развит мощный (около 40 м) остаточный кепрок. Второй соляной купол – Эль-Лисан, по площади более крупный ($16 \times 9 \text{ км}^2$), также с кепроком, приподнят над окружающей поверхностью лишь на несколько метров и покрыт тонким слоем озерных осадков. Купола разделены палеодепрессией, выполненной комплексом средне-верхнеплейстоценовых отложений, неровная поверхность которых, в свою очередь, перекрыта маломощными голоценовыми осадками и толщей рассолов. Вдоль западного борта впадины геофизическими методами прослежено еще одно – закрытое – солянокупольное тело Арват Седом. На глубине соляные купола, вероятно, соединяются в единый соляной массив, в целом штокообразной формы, прослеженный в южной части грабена не менее чем на 40 км при ширине до 10 км.

Глубокие части разреза (особенно глубже 4 км), где предполагаются «корни» солей свиты Седом, изучены слабо. Скважина, достигнув глубины 3672 м, не вышла из солей. Существуют разные интерпретации. В одних публикациях⁸ соляные массы трассируются до глубин 6–8 км, возможно более. В других⁹ нижняя поверхность соляного диапира намечена на глубинах 2–3 км. Судя по приводимым в публикациях материалам, более вероятно распространение солей и в глубоких частях прогиба.

Таким образом, в грабене Мертвого моря на очень ограниченной площади (около 1,5–2,0 тыс. км², т.е. на по-

¹ Обстановки осадконакопления и фации / Под ред. Х.Рединга. М.: Мир, 1990. Т. 2. С. 267.

² Omara S. Diapiric structures in Egypt and Syria // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 1964. Vol. 48. N 7. Pp. 1116–1125; Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Вып. 1. Северная и Южная Америка, Антарктида и Африка. М.: Недра. 1971. 548 с.

³ Atlas of Israel...

⁴ Bentor Y.K. Salt deposits of the Dead Sea region // The Geological Soc. of America. Spec. Paper. 1968. Pp. 139–156.

⁵ The Dead Sea Rift...

⁶ Neev D., Emery K.O. Op. cit.; Bentor Y.K. Some geochemical aspects of the Dead Sea and the question of its age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1961. Vol. 25. Pp. 239–260; Bentor Y.K. Salt deposits of the Dead Sea region...; Zak I., Bentor Y.K. Op. cit.; The Dead Sea Rift...

⁷ Яншин А.Л., Жарков М.А. Фосфор и калий в природе. Новосибирск: Наука, 1986. 191 с.

⁸ Neev D., Emery K.O. Op. cit.; Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Вып. 4. Альпийский Средиземноморский пояс; Милановский Е.Е. Рифтогенез в истории Земли. Рифтогенез на древних платформах. М.: Недра, 1987. 280 с.; и др.

⁹ Tectonics of Sedimentary Basins...

рядок меньше, например, Онежского озера) находится мощное соляное тело, общей штокообразной формы, прижатое к западному борту. Поверхность тела неровная: в западной и южной частях – куполообразная (с максимальной мощностью солей), в восточной и северной – возможно более пластообразная (с минимальной их мощностью). Тело осложняют поднятия и прогибы второго порядка. Общая картина строения соленосного тела отражена на субмеридиональном продольном профиле, проведенном ближе к западному борту грабена (рис. 2).

Соляное тело в целом может рассматриваться как крупный соляной массив, осложненный тремя соляными поднятиями и разделяющими их депрессиями, частично заполненными плейстоценовыми соленосными отложениями, а поверх перекрытыми толщей рассолов. Внешние границы тела и его контакты с породами обрамлений грабена тектонические, фациальные переходы отсутствуют. Заметим сразу, что такое сочетание: крупный массив высшего порядка и осложняющие его сопряженные пары – диапировые поднятия-«горы» и разделяющие их депрессии, часто рассолоносные, – весьма характерно для многих солянокупольных бассейнов мира. К солянокупольным аналогам Мертвого моря мы специально вернемся позже.

Заполненный соляным телом и рассолами грабен Мертвого моря представляет собой в итоге одну из наиболее соленасыщенных структур в мире. Общая масса заключенных в ней солей оценивается величинами порядка 10^{13} т. Хотя по общему объему она безусловно отстает от многих солянокупольных бассейнов-гигантов и супергигантов из-за своей сравнительно ограниченной площади, уступающей некоторым из них (площадью до 100–500 тыс. км² и более) на два порядка и даже больше, но по соленасыщенности – явно лидирует, по сути представляя единый мощный соляной массив, почти нацело выполняющий грабен.

Флюидодинамическая напряженность недр Мертвого моря и способы ее разрядки. Важнейшая особенность как структуры Мертвого моря, так и всего Левантского региона, – высокая и разнообразная неогеодинамическая активность: тектоническая, вулканическая, сейсмическая, галокинетическая, грязевулканическая. Многие геологические показатели свидетельствуют, что проявления такой активности были характерны и для неоген-четвертичной эпохи в целом, и для голоценового, и для исторического времени¹. Так, прямым следствием геодинамической активности является прежде всего «провальный» характер грабеновой структуры с общим погружением до 8–10 км (большая часть которого приходится на плиоценовое время) и очень значительные мощности ее осадочного выполнения. Вулканические поля четвертичного времени широко распространены вдоль восточного обрамления грабена. Хотя проявления вулканизма в голоценовое и историческое время непосредственно в ареале грабена не известны, однако многочисленные проявления палеосейсмичности, характер разрывных и сдвиговых нарушений, контрастные формы рельефа и другие признаки убедительно свидетельствуют о высокой геодинамической активности в течение всего этого времени.

Разрядка флюидодинамической напряженности реализуется как через «настоящий» вулканизм (связанный с магматизмом) и многочисленные землетрясения, так и через интенсивные восходящие разгрузки разнообразных содержащихся в недрах подвижных компонентов – солей, нефтей, газов, рассолов. Одним из наиболее ярких проявлений разгрузки является ее взрывная разновидность – «осадочный» (амагматический) вулканизм: грязевой, газовый, соляной, рассольный, смешанный. Грязевой вулканизм в регионе проявился чрезвычайно широко и масштабно в позднеплиоценовое время, особенно в Северо-Синайской зоне, сформировав, в частности, мощные комплексы известной «формации Хатрурим»: «сопочных брекчий» и других сопряженных грязевулканических образований, а в подстилающем их субстрате – зоны метасоматического преобразования прорываемых пород, обрамляющих многочисленные подводящие каналы². Проявился он и непосредственно вблизи западного и юго-западного обрамлений Мертвого моря (рис. 2). Интенсивные разгрузки углеводородов голоценового времени запечатлены в виде многочисленных скоплений асфальта вдоль побережий Мертвого моря (возможно, представляющих собой лишь фрагменты более значительных площадных покровов, в приповерхностной зоне лишь частично сохранившиеся и локально обнаженные). Выбросы углеводородных газов неоднократно наблюдались непосредственно в грабене Мертвого моря и в историческое время и в наши дни. Зафиксированы они и при бурении мелких скважин, в том числе у самой горы Седом³. Еще один важнейший тип восходящих разгрузок – источники глубинных рассолов. Их распространение, масштабы и природу мы обсудим ниже.

Еще одно следствие и косвенное свидетельство флюидодинамической напряженности – дискретный рост соляных поднятий, обусловленный реологической неустойчивостью в недрах легких и пластичных соляных масс. Особенно значительный рост поднятия купола Седом предполагается в среднеплейстоценовое время. За последние 10 тысяч лет его поднятия, фиксированные ступенчатыми террасами, уступами кепроковых тел, карстовыми и др. образованиями составили примерно 100 м, в том числе 70 м – сравнительно недавно⁴. Неравномерный рост соляных куполов, продолжается и в настоящее время. Именно проявления сеймотектонической и флюидодинамической напряженности недр являются, по нашему мнению, одним из важных регуляторов разнонаправленных колебаний уровня Мертвого моря, обсуждению которых также будет посвящен специальный раздел второй статьи.

Итак, структура Мертвого моря представляет собой своеобразный ромбовидный палеокотлован, заполненный соляными массами и рассолами, которые находятся в условиях флюидодинамической напряженности, повышенных температур и давлений, представляя собой реологически неустойчивую, а возможно и взрывоопасную систему.

«Необычные» особенности Мертвого моря

«Соленосное чудо». Говоря о «соленосном чуде», обычно подразумевают собственно Мертвое «море» – рассольный водоем, уникальный по многим показателям. И хотя этот водоем в действительности является лишь верхней наиболее видимой частью значительно более крупного соленосного объекта, понятие «чуда» все же отождеств-

¹ Бейли В. Указ. соч.; Atlas of Israel...; The Dead Sea Rift...; Библийская Энциклопедия. Изд. Свято-Троице-Сергиевской Лавры, 1990. 904 с.; Копп М.Л., Леонов Ю.Г., Аджамян Ж. Деформации запада Аравийской плиты как результат сдвиговых перемещений по Левантскому разлому // Геотектоника. 1994. № 3. С. 52–65; Трифионов В.Г., Караханян А.С. Указ. соч.; Гилат А. Указ. соч.

² Gilat A. Op. cit.; Сокол Э.В., Новиков И.С., Валник Е., Шарыгин В.В. Указ. соч.; Гилат А. Содом и Гоморра...

³ Khesin B. Op. cit.; Гилат А. Содом и Гоморра...

⁴ Bentor Y.K. Salt deposits of the Dead Sea region. The Geological Soc. of America. Spec.Paper. 1968. Pp.139–156.

Рис. 3. Солёносные бассейны Левантского региона. Составила Г.А. Беленицкая¹.

1 – внутриплатформенные палеорифтогенные складчатые зоны (П – Пальмирская, СС – Северо-Синайская, Е – Евфратская); 2 – позднекайнозойские зоны нарушений: а – рифты (С – Суэцкий грабен), б – сбросы, в – сдвиги-раздвиги (П – Левантская, СА – Северо-Анатолийская), г – сдвиги; 3 – фронт альпийского надвига; 4 – базальты: а – неоген-четвертичные, б – то же, с проявлениями голоценовых; 5 – озера: а – пресные, б – рассольные; 6 – морские акватории (а) и суша (б); 7 – области распространения солей, осложненных солянокупольной тектоникой (пунктирный контур в Средиземном море – ориентировочная граница): а – миоценовых (в Мертвом море – верхнеплиоценовых), б – триасово-юрских (мелкий значок – предполагаемых), в – вероятного сочетания разновозрастных солей с образованием двусоляных диапиров; 8 – области интенсивного проявления наложенной галофильной минерализации (жилы галита, гипса, доломитизация и др.)². СБ – Синайский (Палестинский) блок.

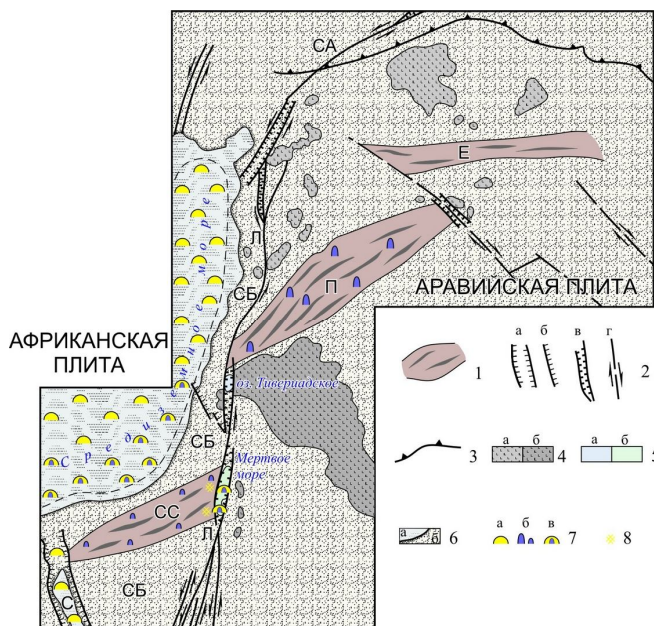


Рис. 4. Панорамы Мертвого моря и побережий, гора Седом, река Иордан³.

а, б – Мертвое море и соляные берега; в – гора Седом; г – река Иордан в Иорданской долине; д – ж – скопления солей, обрастания, корки на мелководье Мертвого моря, соляные сталактиты; з – рассольные ямы.

¹ Неогеодинимическая обстановка по: Милановский Е.Е. Указ. соч.; Копп М.Л., Леонов Ю.Г., Аджамян Ж. Указ. соч.; Лунина О.В. Указ. соч.; с дополнениями.

² Gilat A. Op. cit.

³ Монтаж фото из: Википедия. [Электронный ресурс]. Режим доступа: ru.wikipedia.org/wiki/Иордан; wikipedia.org/wiki/Dead_sea; Опарин А.А. Древний мир и библейская археология. Харьков: Факт, 2004; Он же. Ключи истории. Археологическое исследование книги Бытие. Харьков: Факт, 2003.

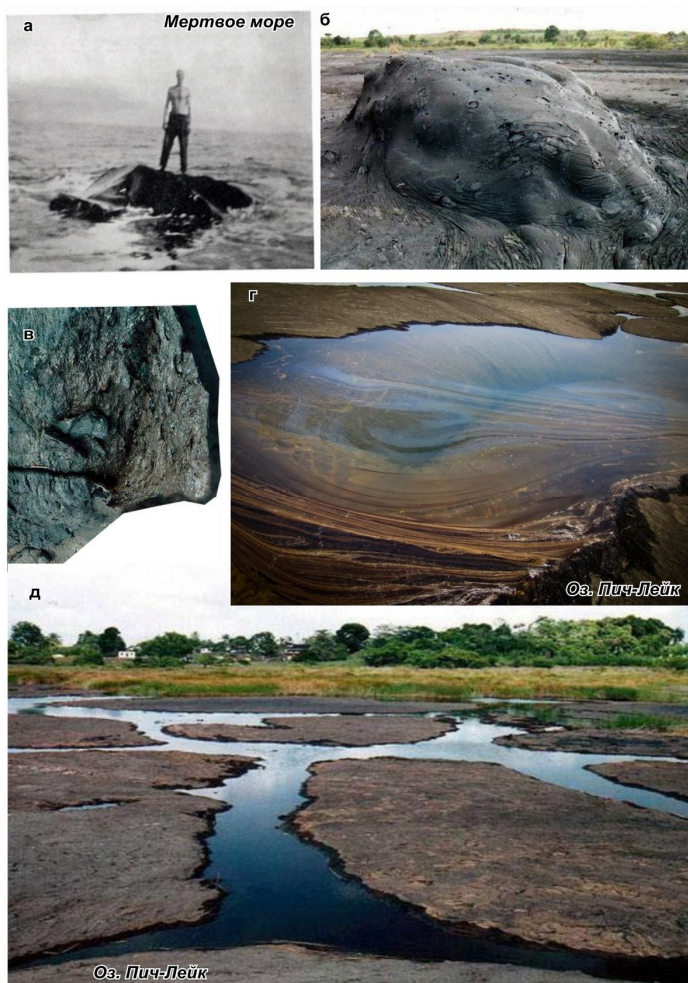


Рис. 5. Асфальтовые озера – Мертвое море и Пич-Лейк (а – из работы Клаппа¹, б – д – с сайтов ru.wikipedia.org/wiki/Пич_Лейк и <http://mygeography.ru/article/pich-lake>.

а – человек на глыбе асфальта в Мертвом море; б, в – глыбоподобное скопление (б) и кусок асфальта (в) на озере Пич-Лейк; г, д – панорамы «битумного» озера Пич-Лейк: г – расплывающийся ирридирующий асфальт, д – куски застывшего и более жидкого асфальта.



Рис. 6. Мертвое море в картинах художников: слева – Гюстав Доре, «Истребление Содома и спасение Лота» 1880-е гг., справа сверху – Джон Мартин, «Содом и Гоморра», первая половина XIX в., внизу – Вильям Холман Хант, «Козел отпущения», 1854.

¹ Clapp F.G. Geology and Bitumens of the Dead Sea Area, Palestine and Transjordan. Bull. AAPG. 1936. Vol. 20. Iss. 7. Pp. 881–909.

ляется именно с ним. И это во многом справедливо. Современное Мертвое море представляет собой заполненный рассолами глубоководный бессточный озерный водоем¹. Это самый низкий участок глубочайшей на Земле депрессии: поверхность озера и его побережий находятся более чем на 400 м (в 2011 г. – на 425,5 м), а дно под слоем рассолов, мощностью до 378 м, – на 750–800 м ниже уровня океана. Озеро занимает значительную часть гигантской грабенной впадины, площадью около 2,0 тыс. км² (шириной 10–15 (20) км, протяженностью ~200 км), ограниченной ступенчатыми разломами амплитудой более 4–6 км. Длина самого озера около 70 км, ширина до 14–18 км. Его площадь еще в середине XX века составляла около 1000 км², а само озеро представляло собой единое целое, лишь частично разделенное выступом полуострова-диапира Лисан на две неравные части: северную глубоководную (до 300–378 м), значительно более крупную (свыше 80% площади), и южную мелководную (до 5 м). За последующие десятилетия в связи с падением уровня рассолов общая площадь сократилась почти на треть (в 2007 г. она оценивалась величиной 650 км²², северный бассейн отделился от южного, глубина которого сократилась до 2–3 м и менее.

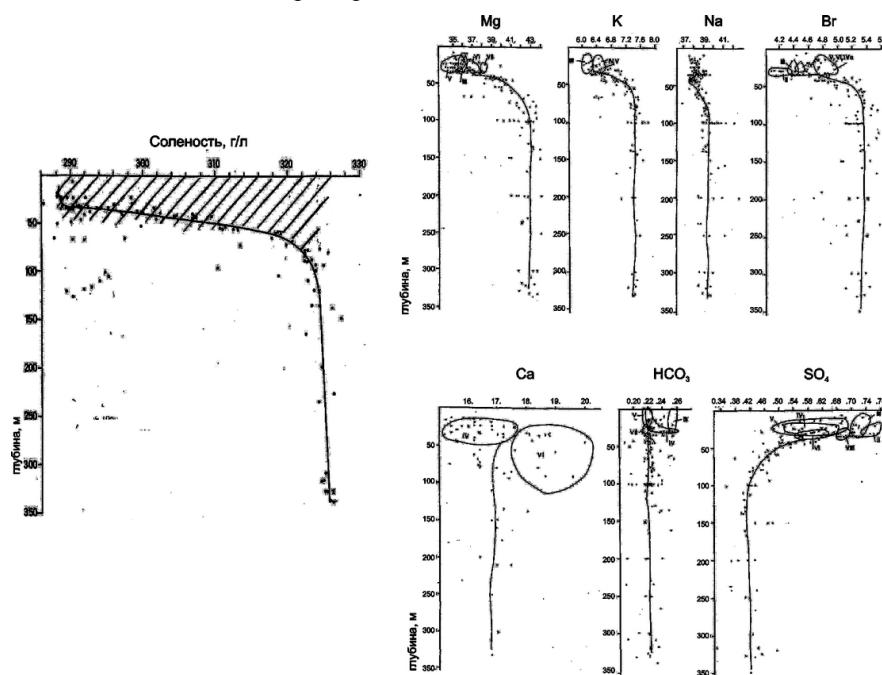
С севера и юга к озеру примыкают прибрежные внутриграбенные равнины. Западные и восточные берега крутые, скалистые. Высота обрамляющих озеро с обеих сторон плато – Палестинского и Трансиорданского – достигает 790 м над уровнем моря³. На расстоянии всего 10–12 км перепад отметок от бортов до поверхности рассолов составляет около 1200 м, до дна озера превышает 1500 м, а до погребенного под осадками дна грабенной структуры – 8–10 км.

Впадина, занятая рассолами, отвечает надсолевой депрессии, осложняющей поверхность выполняющего грабен соляного тела. Сама депрессия может рассматриваться как тектоно-компенсационная муфта, возникновение которой отражает результирующий эффект тектонического и галокинетического прогибания. Дно и борта рассолоносной муфты сложены преимущественно солями, в разной мере перекрытыми соленосными осадками.

Рассолы Мертвого моря знамениты высочайшей концентрацией солей, их плотностью и своеобразием состава (табл. 1). Соленые воды этого «самого низкого в мире озера дрожат в нестерпимом зное»⁴. Соленость рассолов (до 330–336 г/л в глубоких слоях) почти на порядок превышает соленость океанических вод (36 г/л), достигая (а порой и превышая) концентрации рассолов, насыщенных по отношению к NaCl (320–330 г/л или 270–275 г/кг⁵; правда, NaCl в них составляет лишь часть общего количества растворенных солей, больше половины которого приходится на долю других компонентов, что и препятствует массовому осаждению NaCl из этих рассолов). Ныне Мертвое море – самый солёный в мире озерный водоем столь значительной (уникальной) глубины.

Еще одна характерная особенность толщи рассолов – их стратификация (расслоение). На фоне роста от поверхностных зон к глубинам общей минерализации и концентраций большинства макро- и микрокомпонентов четко обособлены два слоя (схема 1). Для нижнего мощного слоя характерны максимальные значения этих показателей,

Схема 1. Вертикальное распределение солености и основных ионов в рассолах Северного глубоководного бассейна Мертвого моря (от поверхности до глубины 350 м). По горизонтали – общая соленость и содержания ионов, г/л, по вертикали – глубины, м. Водоем стратифицирован; заштрихована верхняя зона менее минерализованных и неоднородных по составу рассолов. Точки – единичные пробы, кресты – объединенные, контуры I–VI – групповые результаты отдельных рейсов 1959–1960 гг.⁶



резко восстановительная обстановка и относительная однородность состава и температуры. Верхний слой, мощностью около 40–50 м, характеризуется несколько более низкими значениями общей минерализации и концентраций большинства компонентов, окислительной обстановкой, а также вариациями солености и температуры – в пространстве (относительно устья р. Иордан) и во времени (по сезонам). Правда, в последние десятилетия, судя по материалам прессы, происходит перемешивание рассолов северного бассейна и стратификация сглаживается.

¹ Бейли В. Указ. соч.; Atlas of Israel...; Википедия (wikipedia.org/wiki/Dead_sea, 2011); Мертвое море – Азия – Чудеса природы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nature.worldstreasure.com/miracle.asp?id=33>

² Shalev E., Lyakhovsky V., Yechieli Y. Is advective heat transport significant at the Dead Sea basin? // Geofluids. 2007. N 7. Pp. 292–300.

³ Бейли В. Указ. соч.; Atlas of Israel...

⁴ Мертвое море – Азия – Чудеса природы...

⁵ Зайцев И.К., Толстихин Н.И. Закономерности распространения и формирования минеральных подземных вод. М.: Недра, 1972. 280 с.

⁶ По: Neev D., Emery K.O. Op. cit.

Общий объем рассолов в 60–80 гг. XX века оценивался цифрами ~140–160 млрд. м³, а количество заключенных в них солей – 50×10^9 т. В составе рассолов из анионов преобладает Cl (194,4–221,9 г/л), из катионов – Mg (37,0–44,5 г/л) и Na (36,5–38,6 г/л). Характерны высокие концентрации K (7,3–8,5 г/л), Ca (13,8–16,1 г/л) и Br (4,6–5,5 г/л). Содержание всех этих компонентов растет с глубиной параллельно с ростом общей минерализации (табл. 1; схема 1). Одна из отличительных особенностей рассолов Мертвого моря – высочайшие для поверхностных водоемов концентрации K, Mg и особенно Br. Их содержания на порядок (и более) превышают промышленные кондиции (табл. 1). Повышены, кроме того, содержания Li, Rb и Sr, также несколько превышающие кондиционные или близкие к ним. Рассолы Мертвого моря с полным основанием можно отнести к «жидким рудам», в которых сосредоточены крупнейшие запасы всех перечисленных макро- и микроэлементов. По концентрации брома (до 8 г/л) Мертвое море – практически «самый бромный» в мире открытый водоем; по его содержанию, как и по многим другим показателям, эти рассолы сопоставимы с уникальными подземными рассолами Восточно-Сибирского бассейна. В Израиле и Иордании производится добыча рассолов, обеспечивающая извлечение калия, магния, брома.

Показатели очень низкие (41–42) величины Cl / Br-коэффициента рассолов – одного из общепринятых наиболее значимых генетических¹. Такие значения типичны для глубинных высококонцентрированных подземных и поверхностных рассолов многих соленосных регионов. К их обсуждению мы вернемся позже.

Возраст рассолов (как и верхнего слоя осадков), по данным изотопного анализа C¹⁴, определяется цифрой 12–15 тысяч лет².

Поверхностное водное питание Мертвого моря, помимо скудных атмосферных осадков, осуществляют главным образом воды впадающей в него реки Иордан (рис. 4) и ряд более мелких (до 50–55), обычно пересыхающих водотоков, питаемых преимущественно источниками. Воды р. Иордан в основном пресные (табл. 1). Их соленость в верхнем течении не превышает 0,05 г/л, в среднем – 0,5 г/л, и лишь в приустьевой части, вблизи Мертвого моря, она несколько повышается (до 1,3 г/л) под влиянием восходящих источников рассолов. Поверхностный сток р. Иордан в 1960-е гг. оценивался величиной 1,25 млрд. м³/год³, в 1980-е – 0,85 млрд. м³/год. За последние годы он резко сократился, и с 2000-х годов приводятся величины около 0,1 млрд. м³/год⁴.

Помимо поверхностного, в питании Мертвого моря принимает участие подземный сток, в составе которого доминируют высококонцентрированные рассолы – выщелачивания и восходящие глубинные. Довольно многочисленные источники рассолов распространены вдоль берегов, особенно западного, и на дне моря. Вклад в водный и в солевой баланс Мертвого моря разных источников мы рассмотрим ниже при обсуждении генезиса рассолов Мертвого моря.

Упоминания о Мертвом море привычно сопровождают эпитеты «самое», «наиболее» и т.д.: самое низкое, самое соленое, а из соленых – самое глубокое, самое безжизненное и самое целебное, наконец – самое легендарное. Правда, по большинству показателей «соперники» все же есть. Из всех этих особенностей по-настоящему уникальной и рекордной является лишь самое низкое положение на поверхности суши. Уже следующая по абсолютной глубине (среди глубочайших на планете) впадина Афар с рассольным озером Ассоль больше чем на 250 м «отстает», находясь на отметках «всего» минус 153 м. Что касается площади современной поверхности озера, то даже среди других рассольных водоемов она занимает не первое место, хотя все же весьма значительно, на порядок, превышает площади многих известных рассольных озер, в том числе известных наддиапировых озер Прикаспийской впадины. Зато в большом списке гигантов – крупнейших по площади озер мира (общем для пресноводных и рассольных) Мертвое море – «самое маленькое». Такой вот «миниатюрный» соляной гигант. По своим параметрам оно находится на пределе попадания в этот список: даже его бывшая (в середине XX в.) площадь (около 1 тыс. км²) в 2–3 раза меньше площади следующих (по возрастанию) озер Чаны и Поопо, в 3,5 раза меньше Чудского, в несколько раз – Большого Соленого, в 10 раз – Онежского (зато глубина Мертвого моря в 3–4 раза больше, чем Онежского), в 18–20 – Ладожского, в 30 – оз. Байкал и в 400 – Каспийского. Напомним, что и солянокупольный бассейн Мертвого моря является одним из «самых маленьких» по площади среди солянокупольных бассейнов мира.

«Что в имени тебе моём?»: специфические особенности Мертвого моря, отраженные в его названиях. Многие из важнейших и уникальных особенностей Мертвого моря и связанные с ним события и легенды нашли отражение в разнообразии его названий-эпитетов. Главные из них: Соляное, Асфальтовое, Мертвое, Содомское (море Лота). Для нас важно, что большинство из них имеет ярко выраженную геологическую основу.

Название **«Соляное»** (ивр. «Море соли»), естественно, обязано, прежде всего, его знаменитым рассолам, заключающим около 50 млрд. т соли, а также растущим буквально на глазах неподражаемым по красоте и разнообразию массам соляных кристаллов (рис. 4). Но не только им. Еще – и соляным берегам, и соляным «горам», и кускам соли на побережье, и соляным столпам и т.д. Соляное «царство», где соль – везде: и в воде, и на суше, и в воздухе, и под землей. Экстремальные концентрации солей в рассолах Мертвого моря и их высокий удельный вес (рассолы в 1,3 раза тяжелее воды) создают широко известный эффект «невесомости». Способность удерживать лежащих на их поверхности людей – одно из наиболее наглядных проявлений этих особенностей. (Правда, те же особенности характерны и для многих других, хотя и не столь крупных, рассольных озер, особенно часто наддиапировых – как природных, так и техногенных. Не случайно поэтому название «Мертвое море» стало своеобразным брендом: повсеместно мы встречаем свои «Мертвые моря» – то российские (Баскунчак и др.), то алтайские, то хакасские, то украинские, и наверняка также и мексиканские, американские, австралийские и т.д. Было бы справедливо назвать Соляной и саму грабенную структуру, самую соленасыщенную солянокупольную структуру мира – своеобразную природную «солонку» планеты, одну из ее наиболее «соленых точек».

«Асфальтовое» – другое распространенное название. Именно оно значится как основное в Библейской Энциклопедии. Название обязано обилию находящихся здесь самых разных видов скоплений асфальта – горючей

¹ Bendor Y.K. Some geochemical aspects of the Dead Sea and the question of its age...; Bendor Y.K. Salt deposits of the Dead Sea region...; Neev D., Emery K.O. Op. cit.; и др.

² Neev D., Emery K.O. Op. cit.; Bendor Y.K. Salt deposits of the Dead Sea region...

³ Bendor Y.K. Some geochemical aspects of the Dead Sea and the question of its age...; Neev D., Emery K.O. Op. cit.

⁴ Википедия (wikipedia.org/wiki/Dead_sea); Long-Term Changes in the Dead Sea...