



ДИСКУССИИ

УДК 551.435:551.21 (678)

## Адвективные структуры толщ дна озера Натрон и его окружения (Танзания)

### Advective structures of the bottom of lake Natron and its surroundings (Tanzania)

Барышев А. Н.

Baryshev A. N.

Рассмотрены особенности развития слаболифитированных осадков дна и общей структуры озера Натрон на фоне сезонного его высыхания и обводнения с учётом закономерностей адвекции, периодического размещения ячеистых зональных адвективных структур в пространстве. Конседиментационные структуры в осадках озера демонстрируют условия образования содовых руд и их позиции. Приводимые космо- и аэрофотоснимки содержат уникальную генетическую информацию об эволюции геохимии и развития преобразований морфологии дна в процессе осадкообразования, о наличии двух источников, питающих озеро – речного и грязевых извержений смежного вулкана Олдоиньо-Ленгаи, якобы единственного на Земле, извергающего карбонатитовые лавы. Комбинация двух источников и двух процессов приводит к развитию эпимагматической фреато-гидротермальной рециклинговой системы. В ней массы озера проникают через трещинные структуры в надочаговое пространство вулкана, обеспечивая грязевую вулканизм растворов содовых масс, содержащих органическое вещество осадков. Содовые извержения вулкана не являются карбонатитовыми лавами.

Показано морфологическое подобие и различие структур – мелких кратеров на дне озера, образованных в связи с адвекцией маломощных слоёв осадочного материала, и расположенных рядом крупных кратеров среди вулканических толщ по берегам озера, как кальдер проседания, так и кальдер взрыва, связанных с магматическим и с грязевым типами вулканизма в обстановке присдвиговой транстенсии.

Ключевые слова: озеро Натрон, нелитифицированные осадки, сода, адвекция, ячеистая структура, кратеры, зональность, рифт Грегори.

In this study we consider the features of the development of weakly lithified bottom sediments and the general structure of lake Natron against the background of its seasonal drying and watering. This study takes into account the laws of advection and the periodic placement of cellular zonal advective structures in space. The consedimentary structures in the lake sediments demonstrate the conditions for the formation of sodic ores and their positions. Provided space and aerial photographs depict unique genetic information about the evolution of geochemistry and the development of bottom morphology during sedimentation. This includes the presence of two sources that feed the lake – river and mud eruptions of the adjacent Oldoinyo-Lengai volcano, supposedly the only one on Earth that erupts carbonate lavas. The combination of two sources and two processes leads to the development of an epimagmatic phreato-hydrothermal recycling system. In it, the masses of the lake penetrate through fissure structures into the suprafocal space of the volcano, providing mud volcanism with solutions of soda masses containing organic matter of sediments. Volcanic soda eruptions are not carbonate lavas.

The morphological similarities and differences of structures are shown – small craters on the bottom of the lake, associated with the advection of thin layers of sedimentary material; large craters located nearby among volcanic strata along the shores of the lake; and both subsidence calderas and explosion calderas associated with magmatic and mud types of volcanism in the setting of strike-slip transtension.

Keywords: Lake Natron, unlithified sediments, soda, advection, cellular structure, craters, zoning, Gregory Rift.

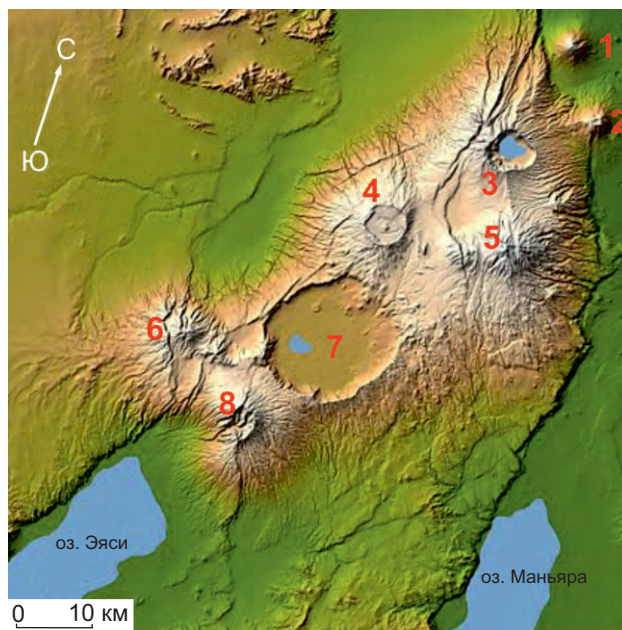
Для цитирования: Барышев А. Н. Адвективные структуры толщ дна озера Натрон и его окружения (Танзания). Руды и металлы. 2022. № 3. С. 101–109. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10019.

For citation: Baryshev A. N. Advective structures of the bottom of lake Natron and its surroundings (Tanzania). Ores and metals, 2022, № 3, pp. 101–109. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10019.

Озеро Натрон весьма интересно в разных аспектах. Его особая позиция, соотношение с окружающими вулканами рассмотрены в статье [2]. Самая главная примечательность озера – чрезвычайно большая щёлочность (рН 9–10,5) за счёт насыщения натровыми карбонатами, откуда и пошло его название. Весьма своеобразны адвективные структуры его дна. Исследовать их сущность дают возможность многочисленные космо- и аэрофотоснимки, выложенные в Интернете, к сожалению, часто без точных сведений об их авторах. Интерес для нас представляет не только озеро, но и кратерные структуры его окружения.

Кратерные структуры на Востоке Африки, в частности в рифте Грегори, проявлены с такой отчётливостью, что территория вулканов с их кальдерами на западном борту рифта именуется Кратерным нагорьем. К кратерам здесь относят кальдеры проседания, как у вулкана Нгоронгоро, и кальдеры взрыва, например на вершине вулкана Олдоиньо-Ленгаи, прилегающего к борту рифта (рис. 1). Кратерное нагорье примечательно и тем, что геоморфология кальдер его вулканов подобна многим кратерам на поверхности Луны, подавляющему большинству которых приписывается ударно-метеоритное происхождение, что весьма дискуссионно.

Кратерное нагорье сложено позднеплиоценовыми и раннеплейстоценовыми породами базальтовой серии [1]. Нижний горизонт составляют базальты, трахибазальты, трахиандезиты, трахиты и пирокласты. В верхнем горизонте к тем же породам добавились фонолиты. Нагорье возвышается над рифтом, но оно не только занимает его позицию. Вдоль единой линии, начиная от северо-западного борта рифта оз. Эяси, по азимуту 29° на протяжении более 250 км «в струнку» размещается цепочка вулканов: Олмоти, Олдоиньо-Ленгаи, Шомболи, Лендурут, Олоргасайлие, Ол-Эсайети. Столь протяжённая прямая линия в сочетании с прямыми линейными структурами фундамента вулканов в восточном борту оз. Натрон и его дна не оставляют сомнения в существенной роли сдвиговых нарушений при рифтообразовании. Именно присдвиговая



**Рис. 1. Вулканы Кратерного нагорья рифта Грегори:**

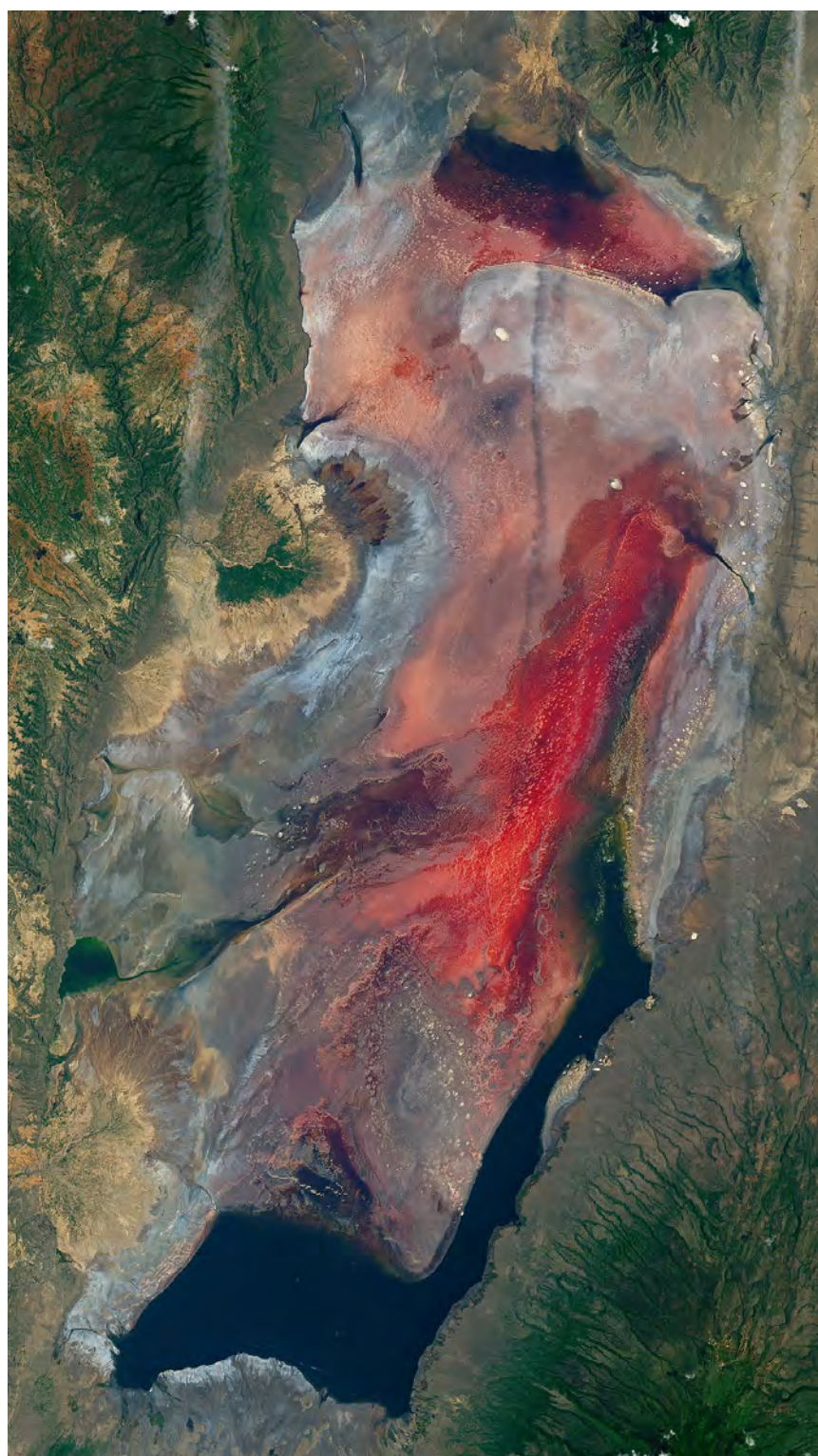
1 – Олдоиньо-Ленгаи, 2 – Керимаси, 3 – Эмбагаи, 4 – Олмоти, 5 – Лулмаласин, 6 – Лемагарут, 7 – Нгоронгоро, 8 – Олдеани

**Fig. 1. Volcanoes of the Crater Highlands of the Gregory Rift:**  
1 – Oldoinyo-Lengai, 2 – Kerimasi, 3 – Embagai, 4 – Olmoti, 5 – Lulmalasin, 6 – Lemagarut, 7 – Ngorongoro, 8 – Oldeani

транстенсия, наряду с гравитационной неустойчивостью астеносферы, служит важнейшим фактором для подъёма глубинных масс, волнообразно развивающихся вдоль одного направления [3]. Адвекция волн приводит к образованию вулканогенных кратеров. В этой же геодинамической обстановке, но не в борту рифта, а на его дне находится оз. Натрон. Соотношение развития вулканов и озера описано в работе [2].

Озеро Натрон простирается с севера на юг на 57 км при ширине до 22 км. На севере оно питается водами р. Эвасо-Нгири с устьем (2°00'40" ю. ш.), расположенным у западного подножия вулкана Шомболи. Река питается главным образом за счёт дождей и несёт много примесей, в том числе органики, что нашло отражение в её названии (в переводе с языка

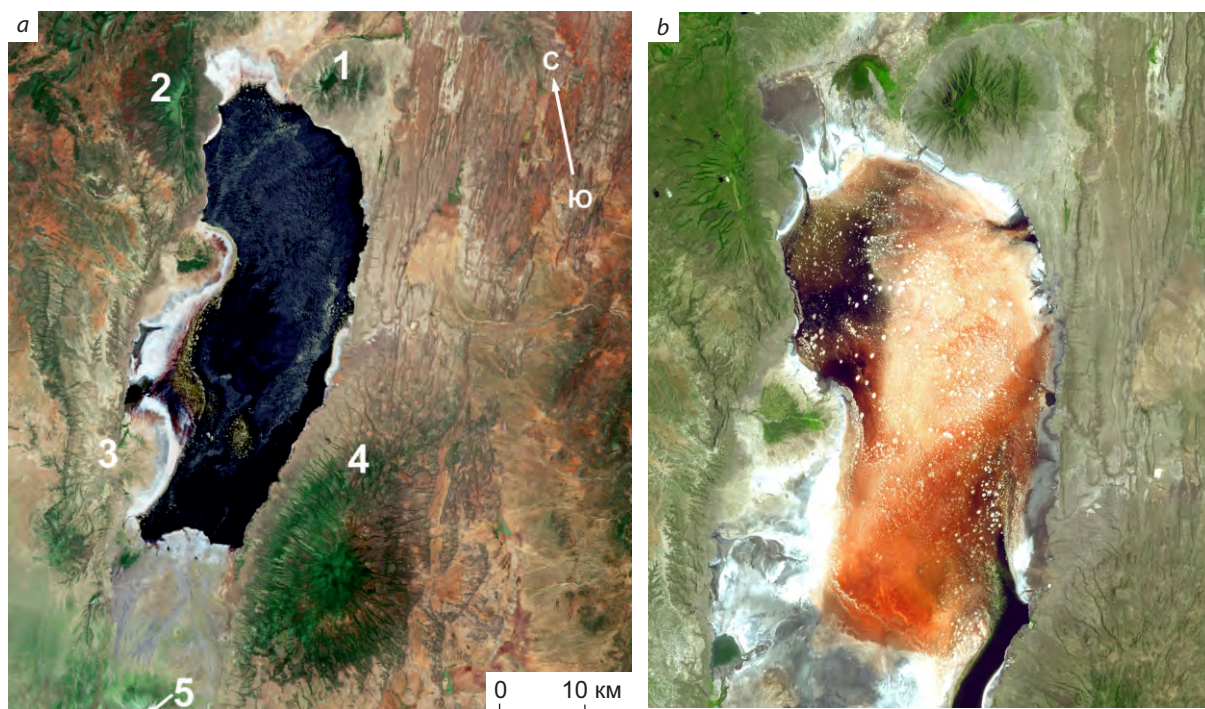




**Рис. 2. Озеро Натрон и его структура, выраженная изменением цвета осадков дна**

Fig. 2. Lake Natron and its structure, marked by the change of colour at the bottom sediments





**Рис. 3. Позиция оз. Натрон относительно вулканов рифта Грегори (а). Потеря контрастности крупных структур дна, возрастание размера ячеистых структур (мелкие белые пятна) при высыхании озера (b):**

вулканы: 1 – Шомболи, 2 – Олдоиньо-Самбу, 3 – Мосоник, 4 – Гелай, 5 – Олдоиньо-Ленгаи; остальные пояснения – в тексте

**Fig. 3. The position of lake Natron relative to the volcanoes of the Gregory Rift (a). Loss of contrast of large bottom structures, increase in the size of cellular structures (small white spots) when the lake dries up (b):**

volcanoes: 1 – Shomboli, 2 – Oldoinyo-Sambu, 3 – Mosonic, 4 – Gelai, 5 – Oldoinyo-Lengai; other explanations are in the text

племени самбуру означает «река коричневой воды»). Распространение озера на юг ограничивается грязевыми потоками от вулкана Олдоиньо-Ленгаи. Глубина водоёма в период дождей достигает 3 м, а в засушливое время его площадь сокращается более чем вдвое. При малом интервале глубин цвет озера позволяет судить о многих особенностях его развития.

Цвет илистого дна зависит от содержания биогенной органики в слоях осадков и её преобразования при отмирании, выгорании и сублимации. Красный цвет обусловлен наличием цианобактерий *Spirulina*, *Cyanospira* – носителей каротиноида *Astaxanthin*. На солнце при

высыхании органика отмирает, выгорает, приобретает сначала тёмно-бурый цвет, а потом чёрный. После этого и чёрная органика сублимирует или выгорает, оставляя белую щелочно-карбонатную основу. Таким образом, смена окраски слоёв определённого ритма отражает годовичные сезонные изменения, а её латеральная зональность – разные глубинные уровни дна. По кольцевым структурам слоёв можно выделять ячеистые адвективные структуры. Большой фактический материал для такого анализа дают снимки озера из космоса (рис. 2, 3).

Дно озера демонстрирует асимметричную зональность, отражающую элементы структу-



ры фундамента, глубину дна и состав его толщ. Максимальную глубину имеет красная зона, находящаяся ближе к восточному борту водоёма. В направлении к его берегам красная зона сменяется бежевой, далее белой. Разных оттенков бурый, серый и чёрный цвета появляются при гибели носителей каротиноида и выгорании органики. То есть цвет слоёв зависит и от глубины, и от экспозиции слоя на солнце при высыхании озера. Чёрные массы на юге озера прошли иную эволюцию. Они снесены с вулкана Олдоиньо-Ленгаи. В его недра сначала были затянуты сверху по разломам продукты осадков, потом извержены в виде чёрных потоков, более мощных, чем осадки на севере озера. Потоки запрудили озеро на юге [2]. Основная рифтогенная зона протягивается от вулкана Олдоиньо-Ленгаи к северо-северо-востоку через западное подножие вулкана Гелаи к восточному подножию вулкана Шомболи. Прямолинейные разломы в восточном борту рифтогена хорошо видны на выжженной поверхности (см. рис. 3, а). Рифтогенная зона осложнена поперечным адвективным поднятием, расположенным юго-западнее вулкана Шомболи (см. рис 2). Поднятие (возможный предвестник зарождения нового вулкана) выражено белыми карбонатными массами, а его волновые осложнения на фоне поднятия – фестончатым контуром границы с бежевыми массами. Осложнения имеют длину волны около 3 км.

На фоне общей картины зональности озера, отражающей малоамплитудные (менее 3 м) поднятия или опускания дна, почти на все зоны накладываются структуры, которые выглядят как белые пятна небольшого размера, нередко образующие цепочки вдоль прямых линий, иногда с выдержанным расстоянием между пятнами, особенно в восточной части озера. Причём по мере высыхания озера пятна становятся более крупными, в чём нетрудно убедиться, сравнивая рисунки 2 и 3. Раскрытие сущности этих пятен помогает установить некоторые закономерности адвекции внутри слоистой толщи дна, адвекции и просачивания вниз карбонатсодержащих растворов при образовании такыров во время высыхания озера (рис. 4–6).

Намечаются два вида пятен: с концентрической зональностью и полностью белые, соответствующие карбонату. Первые состоят из концентрических полос разного цвета. Их происхождение путём адвекции при пластическом внедрении тонкослоистой толщи через расположенную выше толщу сомнений не вызывает. Ячеи могут иметь разные размеры и детали морфологии (см. рис. 4).

По текстуре крупной ячеи (см. рис. 4, а) отчётливо видно, что в адвекцию вовлечена слоистая толща с разной мощностью слоёв. Слои образуют ритмы, завершающиеся белым чистым карбонатом. При этом нижний (внутренний в ячее) слой в своей верхней части формирует серию волнообразных поднятий, не отражающихся вверху в других слоях (т. е. адвекция происходит внутри ритма). Причиной такой адвекции могли стать два обстоятельства: повышенная мощность и меньшая вязкость илистого (тёмного) слоя. Расположенные рядом мелкие ячеи дополнительно демонстрируют другие особенности адвекции. Во-первых, ячеи размещены в одну линию через почти равные расстояния между ними. Это указывает на то, что они находятся над линейной зоной с волновыми осложнениями, вероятней всего, вдоль флексуры или внизу разлома в твёрдых породах. Во-вторых, ячеи не вполне круглые, а эллипсовидные, их концентрическая текстура асимметрична. Это может говорить о том, что массы дна в процессе адвекции слоёв не только всплывали, но и перемещались по латерали (ползли), наклоня и растягивая ячею, искажая симметричную зональность.

При полном высыхании озера, увеличении вязкости масс дна адвекция затрудняется и прекращается (см. рис. 5, а). Перед этим сквозь красный слой (ещё «живой», судя по наличию каротиноида) в него поднимались старые белые слои (см. рис. 5, b, c). Сначала белый карбонатный слой лишь подступал к поверхности красного слоя, потом прорывал его, образуя концентрическую зональность ячеи. Вполне понятно, что такой процесс адвекции в конце своего развития может образовать невысокий вал вокруг ячеи (см. рис. 5, d). Вопрос, каким образом из ячеи удаляется её со-





**Рис. 4. Концентрическая асимметричная зональность ячеек при адвекции тонко слоенной толщи и их пространственная периодичность размещения (пояснения – в тексте)**

Fig. 4. Concentric asymmetric zonation of cells during advection of a thinly layered stratum and their spatial periodicity of distribution (explanations – in the text)



**Рис. 5. Развитие кратеров в илистом дне оз. Натрон, разбитом на блоки, подобные такыру:**

*a* – выделения карбоната с хорошо выраженной концентрической зональностью на поверхности бежевой зоны (вид с севера, вдали вулканы, слева Керимаси, Олдоиньо-Ленгаи, справа Кратерное нагорье); *b-c* – последовательные фазы прорыва дна адвективной ячейки; *d* – кратеры в слоистой толще красной зоны (вид с юга, вдали вулкан Шомболи)

Fig. 5. Development of craters in the muddy bottom of the lake Natron, broken into blocks similar to takir textures:

*a* – carbonate segregations with well-defined concentric zonation on the surface of the beige zone (view from the north, volcanoes in the distance: Kerimasi and Oldoinyo-Lengai on the left, Crater Highlands on the right); *b-c* – successive phases of a bottom breakthrough by an advective cell; *d* – craters in the layered strata of the red zone (view from the south, Shomboli volcano in the distance)



**Рис. 6. Такыр на дне озера. Приуроченность пятнистых белых карбонатных масс к границам полигональных блоков (фото George Steinmetz): о масштабе можно судить по тени от небольшого самолёта рядом с крупным пятном)**

Fig. 6. Takir textures at the bottom of the lake. Confinement of spotted white carbonate masses to the boundaries of polygonal blocks (photo by George Steinmetz): the scale can be judged by the shadow casted by a small aircraft next to a large spot

держимое и при этом выставляется напоказ в стенках кратера слоистость дна озера, остаётся открытым. Ответы могут быть лишь предполагаться. Один из них может следовать из того, что в толщах дна проявляется не только адвекция, но и процессы, сопровождающие образование такыров (см. рис. 6).

Как видно на аэрофотографии, ячеи пятнистых белых карбонатных масс, причём местами с концентрической зональностью, располагаются на границах полигональных блоков. Почти каждый из полигональных блоков такыра размером в несколько десятков метров имеет плавно изменяющуюся окраску, свидетельствующую об относительно большем подъёме левой стороны (более светлой, чем правой). Деформационные структуры (трещины) по границам блоков благоприятствовали проникновению по ним вниз атмосферных вод, которые растворяли карбонаты дна, имевшие повышенную щёлочность.

О результате такого процесса можно судить по редкой фотографии, выложенной в интер-

нете (рис. 7). При прохождении через слоистую толщу вода растворяла карбонаты слоёв толщи дна, а ниже происходило их переотложение в виде сталактитов в пористой среде. При этом более толстые сталактиты образовывались при растворении более мощного слоя.

Можно предположить, что образование небольших кратеров на месте адвективных ячеи поверхности дна озера (см. рис. 5, *d*) происходило по такому механизму. В каждом кратере на дне видны белые массы карбоната, который отсутствует в разрезе стенок. То есть на месте кратера был карбонатный диапир, рвущий слоистую толщу (ячеистая адвекция). Линейная серия «карбонатных грибов», запечатлённая на фото (см. рис. 7), могла образоваться по периодически размещённым ячеям. Илистая масса, в которой возникли сталактиты, очевидно высохла, рассыпалась и вынесена ветром.

Адвективные структуры в толщах дна озера при очень малой амплитуде подъёма проявлены в разном масштабе. Для них характерна асимметричная концентрическая зональность за счёт слоистого характера толщ дна. Существует периодичность пространственно-



**Рис. 7. Образование «многокорневых многослойных грибов» за счёт просачивания карбонатсодержащих растворов в такырах через слоистые толщи дна оз. Натрон**

Fig. 7. Formation of "multi-rooted multilayer mushrooms" due to the percolation of carbonate-bearing solutions in takir textures through the layered strata of the bottom of lake Natron



го размещения мелких ячеек через определённый шаг (длину волны). Максимальная длина волны, осложняющая поверхность крупного поперечного адвективного поднятия на севере озера, составляет около 3 км (см. рис. 2). Для многочисленных мелких адвективных поднятий в верхней части толщ дна длина волны сопоставима с размерами тела фламинго. Эти птицы, выбирая места кормёжки биомассой в илистом дне озера, хорошо подчёркивают структуру крупных ячеек и периодичность размещения мелких (рис. 8)

Итак, геологию оз. Натрон, весьма трудно-доступного для полевого изучения из-за очень большой щёлочности, можно охарактеризовать по многочисленным снимкам, сделанным из космоса и с самолётов. Этому способствует поведение биомассы, изменяющей облик дна, и птицы, питающиеся биомассой. Образование кратеров на вершине вулканов, окружающих озеро, и в осадочных толщах дна озера имеет общее то, что отражает присутствие первоначальной адвекции масс. Однако масштабное выражение последствий адвекции, приводящих к кратерообразованию, в магматических и слабо литифицированных осадочных толщах различно. Вулканические кратеры образовывались за счёт провалов в опустошённое пространство магматических очагов (кальдеры проседания), а в осадочных толщах очень малой вязкости и малых размеров поднятых масс (маломощных слоёв карбонатов) освобождение пространства осуществлялось за счёт растворения поднятых масс небольшой ячейки. Вместе с тем тектонофизическая основа адвекции масс и волновой периодичности размещения поднятий были едины. Эта сторона



**Рис. 8. Фламинго как исследователи зональной структуры крупной ячейки адвекции (а) и периодичности размещения мелких ячеек у восточного берега оз. Натрон (b)**

Fig. 8. Flamingos as researchers of the zonal structure of a large advection cell (a) and the periodicity of the placement of small cells near the eastern shore of the lake Natron (b)

основы позволила взглянуть на структуры дна озера с позиции адвективного (конвективного) поведения осадков до их литификации.

## Список литературы

1. *Апродов В. А.* Вулканы. – М. : Мысль, 1982. – 367 с.
2. *Барышев А. Н.* Вулкан Олдоиньо-Ленгаи (Танзания) и сущность его современных извержений // Отечественная геология. – 2021. – № 3–4. – С. 69–80.
3. *Барышев А. Н., Хачатрян Г. К.* Геодинамика, тектоника алмазоносных систем и минерагения // Отечественная геология. – 2020. – № 6. – С. 88–108.





## References

1. Aprodov V. A. Vulkany [Volcanoes], Moscow, Mysl' Publ., 1982, 367 p.
2. Baryshev A. N. Vulkan Oldoin'o-Lengai (Tanzaniya) i sushchnost' ego sovremennykh izverzhenii [Oldoinyo-Lengai volcano (Tanzania) and the essence of its modern eruptions], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2021, No 3–4, pp. 69–80. (In Russ.).
3. Baryshev A. N., Khachatryan G. K. Geodinamika, tektonika almazonosnykh sistem i minerageniya [Geodynamics, tectonics of diamond-bearing systems and mineralogy], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2020, No 6, pp. 88–108. (In Russ.).

## Автор

### Барышев Александр Николаевич

доктор геолого-минералогических наук  
ведущий научный сотрудник  
AlexBarGeol@mail.ru

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский  
геологоразведочный институт цветных  
и благородных металлов»,  
г. Москва, Россия

## Author

### Alexander N. Baryshev

Doctor of Geology and Mineralogy  
Leading Researcher  
AlexBarGeol@mail.ru

Central Research Institute of Geological Prospecting  
for Base and Precious Metals,  
Moscow, Russia