

**КРАТЕРНЫЕ «ОЗЁРА-УБИЙЦЫ»:
КАТАСТРОФЫ – РИСК – ПРОГНОЗ – ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ
(к экспозиции Музея землеведения МГУ «Вулканы и жизнь»)**

К.А. Скрипко

Катастрофы, разрушение экосистем, гибель животных и людей, связанные с извержениями вулканов и проявлениями газо-гидротермальной деятельности, неизменно вызывают у посетителей нашего музея большой интерес. Спрос на экскурсии и лекции по теме «Вулканы и жизнь» возрастают после каждого сообщения СМИ о природных катастрофах. Один из наиболее интересных и одновременно малоизвестных аспектов этой темы – угроза для жизни людей, дремлющая на дне вулканических озёр тропической зоны.

В 1984 и 1986 гг. в Республике Камерун произошли два трагических события. В 1984 году в облаке удушающего углекислого газа, вырвавшегося из глубин озера Монун, задохнулись 37 человек, в 1986 году аналогичная катастрофа, но гораздо большего масштаба, произошла на озере Ниос: в окрестных посёлках погибли 1746 человек, весь домашний скот, птица и даже насекомые. Трагедия на озере Ниос была включена в список ста великих катастроф (Ионина, Кубеев, 2001, с. 198-201).

Высокогорное, 1090 м над уровнем моря, озеро Ниос (Nyos), находится в департаменте Менчум Северо-Западного региона Камеруна, недалеко от границы с Нигерией. Оно образовалось при заполнении поверхностными и подземными водами воронки взрывного кратера – маара, возникшего около 400 лет назад в результате фреатического взрыва, вызванного превращением в пар подземных вод, нагретых поднимавшейся к поверхности лавой. Площадь озера Ниос примерно 1,4 x 0,9 км, наибольшая глубина – 208 м. Маар Ниос находится на склоне вулканического поднятия Оку (Oku). В сравнительно недавнее геологическое время здесь происходили и магматические извержения: «...на северо-восточном берегу озера Ниос обнажаются застывшие лавовые потоки и пирокластические отложения, содержащие большое количество включений перидотитов» (Трагедия ..., 1987, с. 115).

К юго-востоку от озера Ниос, на расстоянии 95 км, расположено другое высокогорное озеро – Монун (Mounoun). Это озеро диаметром около 350 м и глубиной 95 м образовалось при заполнении водой кратера вулкана, одного из составляющих вулканическое поле Бамбуто (Bambouto).

Вулканические озёра Монун и Ниос расположены в пределах 700-километрового камерунского участка вулканической цепи, которая протянулась в северо-восточном направлении от берега Атлантического океана до высокогорий Камеруна. В юго-западном направлении эта цепь прослеживается ещё «на 700 км через Южную Атлантику до островов вулканического происхождения Аннабон (рис. 1). Вся эта вулканическая цепь представляет собой зону ослабленной земной коры: щелочной вулканизм начался здесь ещё в триасе¹ и продолжается до наших дней» (Трагедия ..., 1987, с. 115).

¹Активная вулканическая деятельность здесь началась задолго до раскола Гондваны и начала разделения Африки и Южной Америки, которое, согласно представлениям тектоники литосферных плит, в этой части Атлантики произошло 110-115 млн лет назад (в конце раннего мела). Длительную вулканическую активность этого региона связывают с наличием «горячей точки» Камерун.



Рис. 1. Вулканическая цепь – след относительного перемещения горячей точки Камерун

В 275 км к юго-западу от озера Ниос находится действующий вулкан Камерун (4070 м). За последние 60 лет он извергался четырежды: в июле 1954 г., в марте 1959 г., в октябре-ноябре 1982 г. и в 2000 г. В этой зоне постоянно происходят и сейсмические события. В 1983 г. в 80 км от озера Монун, в пределах Фумбанского сдвига (Foumban Shear Zone), были отмечены два ощутимых землетрясения. «По сейсмическим наблюдениям, начатым здесь в 1984 году, в среднем каждые трое суток происходят два слабых толчка; в одном из пунктов отмечался "рой" землетрясений – 16 толчков за 16 часов» (Трагедия ..., 1987, с. 115).

Предполагается, что на глубине под вулканическими массивами, на склонах которых расположены озёра Ниос и Монун, находятся магматические очаги, из которых непрерывно поступает диоксид углерода (CO_2). Поднимаясь вверх, он растворяется в подземных водах и в водах кратерных озёр, постепенно насыщающихся им.

При изучении озёр Ниос и Монун было установлено, что воды обоих озёр характеризуются высокой концентрацией растворённого диоксида углерода и большим градиентом увеличения его содержания с глубиной. Кроме того, они имеют практически неизменную по всему объёму и во времени температуру, что, в общем, обычно для озёр тропического пояса. Например, в озере Ниос температура воды «почти одинакова по всей её толще: $+22^\circ\text{C}$ у поверхности и $+23^\circ\text{C}$ в придонном слое» (Трагедия ..., 1987, с. 115). Устойчивая стратификация в водной толще при постоянстве температуры по всему её объёму обеспечивается небольшим ростом концентрации солей с глубиной.

Потенциальная плотность воды, обусловленная содержанием растворённых солей и газов, в обоих озёрах плавно возрастает с глубиной от 0,997 г/куб.см на поверхности озера Ниос и 0,998 в озере Монун до 1,002 у дна обоих озёр (Kling et al., 1994). Любопытно, что, несмотря на высокое содержание CO_2 (7-10 литров газа в 1 литре воды) и бикарбонат-иона (722 мг/л), глубинные воды озера Ниос имеют слабокислую реакцию – $\text{pH}=5,6$ (Озеро-убийца ..., 1993, с. 117).

Стратификация вод двух этих озёр проявляется и в закономерно меняющемся с глубиной содержании кислорода: поверхностный слой воды насыщен кислородом, но уже глубже 10 м кислорода в воде очень мало или нет совсем (Трагедия ..., 1987, с. 115). Глубинные воды характеризуются сильно восстановительными условиями и содержат значительные количества ионов двухвалентного железа (растворённого бикарбоната железа).

Именно эти две особенности озёр Ниос и Монун: устойчивая стратификация водной толщи и поступление диоксида углерода с глубины – и делают их потенциальными озёрами-убийцами.

При постоянном поступлении диоксида углерода с глубины вода озёр, в пределе, стремится к насыщению CO_2 в соответствии с гидростатическим давлением, которое в озере Ниос, например, возрастает от значений чуть меньше 1 атм на поверхности до почти 22 атм в точке с максимальной глубиной. При насыщении концентрация растворённого диоксида углерода в придонном слое озера Ниос может достигать 14 литров в 1 литре воды² (Алексеева, Орлов, 2001, с. 8).

Пока этот уровень не достигнут, в озере происходит постепенное насыщение диоксидом углерода глубинных вод, медленное просачивание его из глубин к поверхности и утечка в атмосферу. При этом диффузия и утечка газа происходят значительно медленнее, чем поступление, и концентрация диоксида углерода в воде со временем растёт. При пересыщении им вод озера или при наличии некоего «спускового механизма»,³ который может вызвать подъём богатых углекислотой глубинных вод к поверхности, до той глубины, на которой они станут пересыщенными CO_2 , этот непрерывный процесс сменяется внезапным взрывоподобным выбросом больших масс диоксида углерода в атмосферу.

В водном растворе, насыщенном CO_2 , уже появление первых пузырьков газа приводит к увеличению объёма и, следовательно, к уменьшению эффективной плотности. Этот эффект нарастает по мере того, как, всплывая, пузырьки газа увеличиваются в объёме. Уменьшение плотности приводит к

²Концентрацию растворённого CO_2 при насыщении им воды несложно посчитать. Растворимость углекислого газа в воде в широком диапазоне давлений подчиняется закону Генри: $C = k \cdot p$, где C – концентрация газа в насыщенном растворе, p – парциальное давление, k – константа Генри. При температуре 20°C и парциальном давлении 1033 гПа (1 атм) в 1 литре воды растворяется 665 мл CO_2 , при 2,5 МПа (около 25 атм) – 16,3 литра. Следовательно, насыщение углекислым газом придонных вод озера Монун, максимальная глубина которого 95 м, может наступить уже при содержании CO_2 , равном 6,8 л газа в литре воды.

³Таким «спусковым крючком для катастрофы может быть землетрясение, вызвавшее оползень, или сильные дожди и ветер, которые способны нарушить границу между слоями, и тогда глубинные воды, поднявшись к поверхности, позволят растворённому в них CO_2 стремительно выделяться в виде пузырей» (Озёра Монун и Ниос ..., 1995, с. 105).

уменьшению гидростатического давления, и это как следствие вызывает пересыщение CO_2 во всём нижележащем столбе воды и цепную реакцию «вскипания» – эффект, подобный выбросу вспенившегося шампанского при открывании бутылки или извержению гейзера, которое происходит, когда вода с температурой более 100°C , находящаяся на глубине под давлением, достигает, наконец, гипсометрического уровня, на котором гидростатическое давление соответствует равновесному давлению кипения воды при данной температуре.

Именно такой выброс огромного количества газообразного диоксида углерода, ранее растворённого в воде кратерного озера Монун, произошёл 15 августа 1984 года, когда углекислый газ, который долгое время скапливался в озере, в конце концов вырвался наружу. Бурное выделение газов вызвало появление на поверхности озера Монун пятиметровой волны, которая повалила деревья на берегу озера (Силкин, 1987, с. 37). Это было «своеобразное озёрное цунами» (Смерть приходит ..., 1987, с. 45).

Вот какие подробности о лимнологической катастрофе на озере Монун сообщают Борис Силкин (1987) и Валентин Псаломщиков (2001): «Ранним августовским утром 1984 года по дороге к камерунской деревне Нжидун двигался автофургон. За рулём его сидел молодой приходской священник Жан Фубу, рядом – случайный попутчик. Вдруг Жан увидел на обочине мотоциклиста, казалось, уснувшего за рулём. В его позе было что-то неестественное. Вместе со спутником священник вышел из машины и подошёл ближе. Осмотрев мотоциклиста, они убедились, что тот мёртв. Возвращаясь к машине, Жан почувствовал тошноту, головокружение и потерял сознание. Его спутник тоже едва держался на ногах, но привёл водителя в чувство, помог ему добраться до фургона, и они поспешили покинуть это страшное место».

Через пару часов, в 10.30 утра, на месте происшествия появились представители властей – местный врач и полицейский. При осмотре окрестностей они обнаружили тела 37 погибших людей. Все они лежали на двухсотметровом отрезке дороги или поблизости от неё. По заключению врача, шедшие на базар жители ещё до рассвета погибли от удушья, попав в загадочное ядовитое облако.

Но абсолютно непонятным для врача было появление на телах погибших странных ожогов, описанных им как химические ожоги первой степени, хотя одежда совершенно не пострадала. Вулканологи из США Х. Сигурдссон и Дж. Девайн, приглашённые правительством Камеруна для расследования причин трагедии на озере Монун, предположили, что химический ожог могли вызвать присутствовавшие в газах оксиды азота или капельки азотной кислоты (Озеро-убийца ..., 1986; Силкин, 1987, с. 37). Позднее, после изучения такой же катастрофы на озере Ниос, было высказано другое мнение: эти «ожоги» были обусловлены обморожением открытых частей тела⁴.

⁴Известно, что как выделение растворённой в воде двуокиси углерода, так и адиабатическое расширение газа, находившегося перед этим под давлением, идут с поглощением энергии и, соответственно, вызывают понижение температуры. Вспомним, как невозможно взяться голыми руками за мгновенно покрывающийся инеем углекислотный огнетушитель. Ведь при выпуске из него углекислого газа, первоначально находившегося под давлением 5,7 МПа (58 кгс/см^2), температура CO_2 уменьшается с плюс 20°C до минус $60 - 70$ градусов.

Облако газов, извергнутых из озера Монун на рассвете 15 августа 1984 года (более тяжёлое не только из-за ббльшей в полтора раза плотности диоксида углерода по сравнению с газами воздуха – азотом и кислородом, но и вследствие более низкой температуры), постепенно набирая скорость, скатывалось по склону вулкана, не только удушая, но и «обжигая» людей, животных и растительность необычным здесь, в Камеруне, холодом. Скапливаясь в низинах, этот газ вытеснял оттуда воздух, так что людям и животным, оказавшимся в них, нечем было дышать.

Позднее врач, проводивший вместе с полицейским обследование участка дороги, вспоминал, что видел протянувшееся на 200 м облако, напоминавшее дым.⁵ Газ имел горьковатый вкус и запах, вызывал головокружение, тошноту и рвоту. Чтобы приблизиться к озеру, им пришлось ждать четыре часа, пока воздух не очистился. Между дорогой и берегом озера ими были обнаружены безжизненные тела десятков животных, а вся трава и кустарники погибли (Озеро-убийца ...,1986; Силкин, 1987, с. 37).

17 августа они осмотрели озеро. «Его обычно чистые спокойные и прозрачные воды на этот раз приобрели коричневато-бурую окраску и были явно чем-то взбаламучены» (Силкин, 1987, с. 37). Это и понятно. При взрывоподобной дегазации озера произошло перемешивание водной толщи и подъём к поверхности богатых углекислым газом глубинных вод, а возможно, и взмученных донных отложений.⁶ При исследовании состава глубинных вод озера Монун была обнаружена исключительно высокая концентрация в них ионов двухвалентного железа (растворённого гидрокарбоната железа) и большое количество карбоната железа – сидерита – в донных осадках (Озеро-убийца ..., 1986). Когда глубинные воды поднялись на поверхность и смешались с водами, насыщенными кислородом, двухвалентное железо окислилось, и образовавшаяся взвесь гидроксида трёхвалентного железа придавала воде коричневато-бурую окраску.

Озеро Монун заполняет кратер вулкана. Сразу возник вопрос: не была ли катастрофа вызвана внедрением расплава? Однако, «хотя изотопный анализ углерода подтвердил его вулканическое происхождение», американские вулканологи Х. Сигурдссон и Дж. Девайн отвергли идею вулканического (точнее, фреатического) извержения, связанного с внезапным внедрением магмы и поступлением высокотемпературных газов как причины катастрофы, поскольку

⁵Они видели облако, напоминавшее дым, значит, это было не просто облако углекислого газа, «газа без цвета и запаха», это был туман, аэрозоль, в котором содержались и капельки сконденсировавшейся воды или захваченные выделявшимся газом мельчайшие брызги воды озера. А неприятный горьковатый запах (или вкус) ей придавали растворённые в воде озера бикарбонаты железа, магния и натрия, суммарная концентрация которых могла составлять до 500 мг/л.

⁶Это перемешивание напоминает осеннюю циркуляцию, регулярно наблюдающуюся в озёрах умеренных широт, когда накануне ледостава поверхностные воды, остывая и приближаясь к температуре наибольшей плотности (+4°C), опускаются на дно, а навстречу им поднимаются более тёплые, а следовательно, и более лёгкие придонные воды. Вместе с ними на поверхность поднимаются и донные взвеси, делая воду мутной. В эти дни на короткое время во всей водной толще озера устанавливается одинаковая температура.

«в придонных водах обнаружено лишь незначительное количество серы, галогенов и других химических веществ, характерных для высокотемпературной вулканической активности» (Озеро-убийца ...,1986). Поэтому они пришли к заключению, что вырвавшийся из озера углекислый газ накапливался в озере постепенно, в течение многих лет.

Озеро Монун – один из многих небольших водоёмов Камеруна, которые расположены в кратерах «дремлющих» и, казалось бы, давно потухших вулканов. Поэтому американские вулканологи, приглашённые для расследования трагедии на озере Монун, предупредили, что «подобная трагедия может повториться на любом озере Камеруна, образовавшемся в кратере вулкана»⁷ (Озеро-убийца ...,1986). И действительно, через два года, чуть ли не день в день, 21 августа⁸ 1986 года, в том же Камеруне произошла трагедия, вызвавшая ещё ббльший резонанс во всём мире. Выброс гигантского объёма углекислого газа произошёл из озера Ниос, расположенного в кратере вулкана, в последний раз извергавшегося около 400 лет назад.

Армейские части и группы добровольных помощников, прибыв на место катастрофы, обнаружили тела 1746 погибших. В посёлках Ниос, Субум, Ча и Фанг почти не осталось жителей, погиб весь домашний скот (более 20 тысяч голов), птица и даже насекомые. В деревне Ниос, расположенной недалеко от берега одноимённого озера, из 700 жителей в живых остались только четверо.

Трагическая картина предстала перед глазами смельчаков, репившихся приблизиться, чтобы оказать помощь нескольким случайно уцелевшим жителям четырёх деревень, расположенных вблизи озера Ниос. «В первой деревне, которую мы пересекли, мы увидели мёртвых мужчин и женщин, распростёртых на земле перед их хижинами или на кроватях, иногда прямо на тропинках. ... Как будто взорвалась нейтронная бомба – ничего не повредив, но убив всё живое!». Это слова голландского пастора, отца Хорна, посетившего берега рокового озера спустя два дня после катастрофы.

⁷Известный французский вулканолог Гарун Тазиев считает, что подобные катастрофы возможны ещё на шести озёрах Камеруна, три из которых находятся в северо-западном Камеруне, вблизи городка Вум (Wum) с населением 24 тысячи человек (Смерть приходит ..., 1987, с. 45; Эттингер, Боярский, 1988, с. 94).

Французские геохимики из Института гляциологии и геофизики окружающей среды (Гренобль, Франция) во главе с М. Пурше (M. Pourchet) при отборе колонок донных осадков в наиболее глубокой части соседнего с Ниосом озера Бамбулуве наблюдали бурное выделение пузырей углекислого газа, «что говорит о его высокой концентрации, близкой к насыщению». Если лимнологическая катастрофа случится на этом озере, последствия могут быть куда более тяжёлыми: всего в 10 км от озера находится густонаселённый курортный район Баменда» (Камерунские озёра ..., 1989), где, согласно переписи, проживает 393 835 человек.

⁸Как отмечают исследователи, обе катастрофы – и в 1984, и в 1986 г., – «случились в августе, в наиболее холодное и дождливое для данных мест время. Кроме того, 80-е годы вообще были в Камеруне периодом наибольшей влажности и рекордно низких температур за всё время метеорологических наблюдений». В связи с этим учёные в качестве одной из наиболее вероятных причин обеих катастроф рассматривают опускание на дно скопившихся после ливней масс поверхностных вод, которые были несколько холодней и плотней, чем нижние слои. (Озёра Монун и Ниос ..., 1995, с. 105).

«Повсюду лежали мёртвые... Картина трагедии была такой жуткой, как будто бы взорвалась нейтронная бомба. Жизнь практически ушла из лесов, с полей, хотя круглые глинобитные хижины с островерхими соломенными верхами продолжали стоять, как ни в чём не бывало» (Ионина, Кубеев, 2001, с. 199).

Помимо 1746 погибших, несколько тысяч человек получили в тот день отравления разной степени, 548 человек были госпитализированы. У всех госпитализированных и обратившихся за помощью «симптомы были сходны с теми, что бывают при воздействии удушливых газов ..., все поступившие в больницы были без сознания, многие – часами, что указывает на высокую концентрацию газа» (Озеро-убийца ..., 1993, с. 117).

Причина гибели от вдыхания CO_2 – безусловный рефлекс. «Когда человек вдохнёт углекислый газ, в крови повышается содержание этого газа. От этого рефлекторно увеличивается частота и глубина дыхания,⁹ и кровь ещё больше насыщается углекислым газом, неспособным поддерживать жизнь». Остаться в живых повезло немногим счастливым, оказавшимся на возвышенных участках, выше уровня облака газа, или тем, кто находился в замкнутом пространстве, где сохранилось достаточное количество кислорода, например, в плотно закрытом чулане. Выжили также «те, кто смог задержать дыхание, пока сквозняки не рассеяли смертоносный газ. Так, один из переживших катастрофу рассказывал, что от страха он засунул голову в ведро с водой, стоявшее в хижине. Когда он вытащил голову, его семья была мертва» (Смерть приходит ..., 1987, с. 45).

Люди, жившие вокруг озера Ниос, рассказывали, что сначала услышали басовитый рокот, а затем через несколько минут «почувствовали странный запах, быстро ставший удушливым. Крестьяне стали выбегать из хижин, но бежать было некуда – площадь более 25 квадратных километров оказалась покрыта облаком ядовитого газа. Вскоре трупы людей и животных усеяли окрестности озера» (Смерть приходит ..., 1987, с. 44). Свидетели описывали запах газа, как запах не то пороха, не то тухлых яиц. Оба эти запаха указывают на присутствие соединений серы.¹⁰

Трагедия на озере Ниос произошла 21 августа 1986 года, около восьми часов вечера. Многие жители камерунской деревни Ниос ложились спать (в

⁹Исследования показали, что повышение содержания CO_2 в воздухе до 6% вызывает увеличение глубины дыхания с 670 до 2100 мл, а частоты – с 14 до 27 раз в минуту (Дублянский, 2000, с. 255; Дублянский и др., 2004, с. 103).

¹⁰Британские исследователи выразили сомнения в достоверности некоторых сведений, полученных путём устных опросов жителей, переживших катастрофу. Например, они отмечали, что «трудно объяснить, почему некоторые жители посёлка Субум, находящегося в 10,4 км от озера, утверждают, что они одновременно слышали грохот взрыва и чувствовали «дурной запах», хотя газовое облако могло преодолеть это расстояние за полчаса, а звук – за 32 секунды». Во-вторых, анализ состава растворённых газов, выполненный на месте, показал, что они на 99,6% представляли двуокись углерода; кроме того, в пробах содержались метан и небольшое количество гелия. В то же время ни одна из взятых проб воды не содержала сернистых газов. По мнению исследователей, это противоречит показаниям выживших жителей, утверждающих, что в момент бедствия они чувствовали запах тухлых яиц или пороха (Озеро-убийца ..., 1993, с. 117; Силкин, 1993, с. 21). Они просто неверно описывали запах.

тропиках темнеет быстро), некоторые были заняты домашними делами. В этот момент огромные массы газа стремительно «выплеснулись» на поверхность озера, образовав волны высотой до восьми метров. «По характеру повреждений была установлена точка, откуда распространилась волна, сфокусированная берегами так, что ей удалось перехлестнуть 75-метровый полуостров на севере озера». Район наибольших волновых повреждений находился у южного побережья озера. «Вырвавшийся на поверхность гигантскими пузырями газ породил мощные волны, ринувшиеся к низинам на южном берегу. Образовавшийся из газа и влаги туман, образовавший холодный аэрозоль, облаком потёк по долинам, окружающим озеро, где сосредоточено население» (Озеро-убийца ..., 1993, с. 117; Силкин, 1993, с. 21).

Облако газа поднялось по стенкам каменной чаши, окружающей озеро, на высоту 1214 метров¹¹ (Экспедиция ...1990), а затем «рухнуло» в долину. Газ, выброшенный из озера Ниос, устремился двумя потоками по горному склону, вдоль долин рек и ручьёв и уничтожил всё живое на расстоянии до 27 км от озера. Скорость движения облака газов местами превышала 70 км в час (20 м/с). «Плотность и скорость движения взрывного облака были столь высоки, что в некоторых местах оказались поваленными кукурузные и банановые посадки» (Трагедия ..., 1987, с. 115). В долине погибла вся растительность. Урожай кофе, какао, бананов, домашний скот – всё пропало. Судя по местам находок погибших животных, двигавшееся облако газов не поднималось выше 100 м над дном долин.

«Обследования, проведённые экспедициями из Италии, Франции, Японии, Нигерии, Швейцарии, США и Великобритании, установили, что пострадала растительность по берегам озера. Листва покрылась коричневатой плёнкой. Кое-где листья почернели и съёжились, как от холода. Был сделан вывод: это следствие того, что газ, выделившийся из недр озера, расширяясь, охладился и как бы "приморозил" листву. Известно, что выделение растворённого в воде диоксида углерода CO₂ – реакция эндотермическая. Она идёт с поглощением энергии и соответственно вызывает охлаждение окружающей среды. В данном случае похолодание могло составить 10 градусов» (Силкин, 1993, с. 21; Озеро-убийца ..., 1993, с. 117).

Это явление позволяет объяснить причину как гибели растений, так и появления волдырей, напоминающих «ожоги», на коже многих погибших и выживших людей; эти волдыри, скорее всего, возникли не под «воздействием изверженных газов», как полагали некоторые, но в результате обморожения. «Отмечено, что на теле некоторых погибших и живых были волдыри. Вулканологи принимали это за свидетельство воздействия горячих или кислотных газов, выброшенных извержением. Но у живых они оказались лишь поверхностными и быстро зажили» (Силкин, 1993, с. 21; Озеро-убийца ..., 1993, с. 117).

¹¹1214 м – это, по-видимому, абсолютная высота кромки кратера, внутри которого находится озеро Ниос, т.е. 124 м над уровнем озера. (Абсолютная высота поверхности озера – 1090 м).

Как и при катастрофе на озере Монун, чистый голубой цвет вод озера Ниос сменился на красно-бурый. «После взрыва верхний 10-метровый слой воды в озере окрасился в красно-бурый цвет,¹² содержание углекислого газа достигло высокого уровня. Его выделение с поверхности озера продолжалось несколько суток, увеличивая число жертв в низинных местах» (Трагедия ..., 1987, с. 115-116). На следующий день после катастрофы погибла девочка, которая забрела в низину, заполненную газом. «Едва не погибли находившиеся на побережье озера Ниос французский геолог Р.-М. Шаврие и её спутники, избегнувшие гибели благодаря тому, что успели взобраться на вершину одного из окружающих озеро холмов» (Эттингер, Боярский, 1988, с. 94).

Изучение изотопного состава кислорода и углерода с несомненностью подтвердило глубинное происхождение углекислого газа (Озеро-убийца ..., 1993, с. 117; Силкин, 1993). Однако предположение, что катастрофа на озере Ниос связана с пробуждением «спящего» вулкана, высказанное некоторыми исследователями, было, как и в случае озера Монун, отвергнуто.

Исследования на озере Ниос, проведенные учёными разных стран в последующие годы, позволили оценить количество диоксида углерода, накопившегося в озере Ниос накануне лимнологической катастрофы, и количество CO₂, извергнутого при катастрофе, а также наметить способы, как не допустить повторения трагедий в будущем.

«Впоследствии учёные установили, что под дном озера (глубина около 200 м) расположены выходы вулканических газов. Тогда, к моменту извержения, в воде скопилось примерно 300 млн м³ CO₂, из которых около 80 млн м³ в результате нарушения водной стратификации со взрывом вырвалось наружу (процесс подобен происходящему при снятии пробки с бутылки шампанского). С тех пор газ постепенно снова продолжал накапливаться» (Укрощение ..., 2001, с. 29).

Возникли вопросы: «почему в момент события озеро потеряло лишь часть растворённых в нём газов¹³; каким образом стабильные придонные воды могли поступать наверх, не нарушая осадочных пород; почему химический состав воды на глубине свыше 150 м остался неизменным и после событий» (Озеро-убийца ..., 1993, с. 117).

По силе и характеру повреждений было определено место возникновения волн. Оно находилось недалеко от северного берега озера, примерно в 200 м от него. По-видимому, в этом месте глубина озера не превышает 150 м (Озеро-убийца ..., 1993, с. 116).

¹²Придонная вода озера Ниос «прозрачна и содержит большое количество солей двухвалентного железа, которые при соприкосновении с воздухом выпадают в красноватый осадок» (Трагедия ..., 1987, с. 115).

¹³К. Титце (К. Teitze) из Института геологии и минералогии в Ганновере (Германия) предложил схему, объясняющую, как могло случиться, что в циркуляцию не был вовлечён весь объём озера: «Ядро насыщенной газом воды поднимается внутри "цилиндра", образованного охлаждённой погружающейся водой. Подобный процесс мог осуществляться даже в ограниченной части озера: по мере подъёма газированного ядра поверхностная холодная вода затягивается в "цилиндр", а остальная часть озера остаётся незатронутой» (Озеро-убийца ..., 1993, с. 117).

«Выполненный в лабораторных условиях немецкими учёными анализ позволил заключить: сразу после катастрофы в водах озера содержалось около 250 млн м³ CO₂ (измеренного при стандартных температуре и давлении)¹⁴ . . . Новые измерения, сделанные уже в апреле 1992 года, свидетельствуют, что CO₂ продолжает поступать в озеро со скоростью около 5 млн м³/год» (Озеро-убийца . . ., 1993, с. 117; Силкин, 1993, с. 21). Объём углекислого газа, накопившегося в меньшем по размеру озере Монун, оценен в 15 млн м³ (Экспедиция . . ., 1990).

Геохимики Дж. Клинг, У. Эванс, М. Таттл и Г. Тейнилик из Мичиганского университета, Анн-Арбор, США, измерив парциальное давление CO₂ на разных глубинах в озерах Ниос и Монун в декабре 1989 г., в сентябре 1990 г. и марте 1992 г., обнаружили, что содержание растворённого CO₂ год от года увеличивается, и предупредили о возобновлении угрозы катастроф в недалёком будущем (Следующая катастрофа . . ., 1991). К марту 1992 г. степень насыщения CO₂ ($P_{\text{газ}}/P_{\text{нас.}}$) у дна озера Ниос достигла 0,55, а в придонных водах озера Монун – 0,78¹⁵ (Kling et al., 1994, p. 405). «Измерения показывают: если скорость этого процесса сохранится на нынешнем уровне, донные воды в оз. Ниос окажутся насыщенными CO₂ менее чем за 20 лет, а в оз. Монун – менее чем за 10 лет. Насыщение идёт столь интенсивно потому, что водная толща в обоих озёрах чётко стратифицирована» (Озёра Монун и Ниос . . ., 1995, с. 105). К 2000 году содержание CO₂ у дна озера Ниос достигло 10,5 литра на литр воды (Алексеева, Орлов, 2001, с. 8) – 75% насыщения!

Чтобы предотвратить повторение катастроф, подобных произошедшим в 1984 и 1986 гг., начиная с 1989 года на обоих озёрах проводились эксперименты по откачке глубинных вод, а затем в феврале 2001 года в озере Ниос, а в январе 2003 года – и в озере Монун были установлены постоянные выводные трубы, предназначенные для того, чтобы выпустить через них часть насыщенных углекислым газом глубинных вод и понизить содержание этого газа в озёрах до безопасного.

«В феврале 2001 г. группа учёных из Савойского университета в Шамбери (Франция) во главе с геохимиком М. Хальбваксом¹⁶ (Halbwachs) вывела на середину озера трёхметровый плот, с которого в глубину был опущен 200-метровый полиэтиленовый шланг. По нему на поверхность с придонного слоя начала поступать вода, насыщенная CO₂, причём никакой энергии для подъёма её не требовалось» (Укрощение . . ., 2001).

В былые годы человек, случайно очутившийся в этих краях, не заметил бы ничего необычного в этих двух озёрах. Сегодня же посреди них из воды бьют грандиозные искусственные фонтаны высотой в десятки метров (рис. 2).

¹⁴Или около 500 тысяч тонн CO₂.

¹⁵7,7 литра газа в 1 литре воды в озере Ниос и 5,3 литра газа в 1 литре воды в озере Монун.

¹⁶Такая транскрипция фамилии принята во всех публикациях в журнале «Природа» и в статье Галины Алексеевой и Вячеслава Орлова (2001). Авторы статей в журнале «Наука и жизнь» произносят эту фамилию «Альбвак». В цитатах сохранена оригинальная транскрипция.



Рис. 2. Дегазация озера Ниос. Высота фонтана вспененной воды достигает 50 м

Полиэтиленовая труба диаметром 10 см со свинцовым грузом на конце, опущенная с плота на дно озера, служит подобием «соломинки», с помощью которой пьют напитки. Сначала в трубу засасывают придонную воду, а затем, когда вода в трубе поднимается до уровня, на котором она становится насыщенной CO_2 , насос можно отключить, так как после того, как началось выделение пузырьков газа, ранее растворённого в воде под давлением, смесь воды и газа поднимается к поверхности сама (Озёра-убийцы, 2003, с. 80) за счёт газлифта – эффекта подъёма жидкости при расширении газа. При подъёме воды к поверхности растворённый в ней диоксид углерода, вследствие уменьшения давления, отделяется в виде пузырей, и смесь воды и всё увеличивающихся в объёме пузырьков газа со всё большей скоростью поднимается по трубе и на выходе «выстреливает» струю вспененной воды. Эта струя, вырывающаяся из трубы со скоростью около 100 км в час (30 м/с), поднимается на высоту 40-50 м. Каждый литр воды выносит на поверхность около 10 литров выделяющегося в воздух углекислого газа (Укрощение ..., 2001).

Автор этого проекта, Мишель Хальбвакс, директор Лаборатории геофизических приборов в университете города Шамбери, пояснил: «Наш способ очень прост и дешёв. Мы погружаем на глубину двести метров обыкновенную трубу в вертикальном положении. С помощью насоса закачиваем в неё воду, насыщенную газом. Затем эта смесь самопроизвольно поступает на поверхность, образуя гейзер. Так происходит искусственное извержение, которое в небольших объёмах не представляет особой угрозы. Однако тем самым мы уменьшаем

количество газа на дне, лишая озеро-убийцу его силы. Нам понадобилось десять лет на разработку этого проекта» (Алексеева, Орлов, 2001, с. 9).

Начиная свой эксперимент, Мишель Хальбвакс был полон оптимизма: «За пять лет можно полностью очистить озеро от углекислого газа, тогда исчезнет угроза очередной катастрофы. Люди смогут спокойно вернуться и жить лет сто-двести в этих красивейших местах без опаски. Правда, для этого нужно задействовать пять аналогичных установок одновременно. Мы же за год извлечём 20 миллионов кубометров газа, что позволит провести не полную дегазацию озера, а лишь отвести беду на десятки лет, на время успокоив чудище озера Ниос» (Алексеева, Орлов, 2001, с. 9).

Критики эксперимента Мишеля Хальбвакса не исключали, что «при используемой технологии именно она может нарушить стратификацию вод. ... Были опасения, что операция может привести к возникновению придонных течений, а те вызовут выброс CO_2 ». Предполагалось также, что подъём придонных вод могут вызвать опускающиеся на дно отработанные воды, охладившиеся вследствие дегазации. В связи с этим район озера был оцеплен войсками, чтобы никого, кроме участников работ, к нему не подпускать. Но после соответствующих измерений состояние водоёма признали стабильным (Озёра-убийцы, 2003, с. 80).

Критики предложенной методики также указывали, что процесс дегазации озера идёт чрезвычайно медленно. За два года эксперимента из 500 тыс. т диоксида углерода, содержащегося в воде озера Ниос, было изъято лишь 28 тыс. т, что составляет около 6%. Кроме того, «как недавно установлено, накопление у дна новых масс диоксида углерода идёт почти в том же темпе, как и его откачивание». ... Так что на полное обеззараживание Ниоса при нынешних темпах может уйти от 30 до 59 лет, за которые не исключена возможность новой катастрофы» (Озёра-убийцы, 2003, с. 80-81).

В январе 2003 года начались аналогичные работы по обезвреживанию озера Монун. В них приняли участие М. Хальбвакс и японские специалисты под руководством геохимика М. Кусакабэ из Университета г. Окаяма. Они посчитали, что, если за ближайшие два года из озера Монун будет изъято 28 тыс. т CO_2 , этого будет достаточно, чтобы отвести опасность взрыва (Озёра-убийцы, 2003, с. 80).

Итак, потенциальные «убийцы», подобные озёрам Ниос и Монун, – это глубокие озёра вулканических областей, находящиеся в тропической зоне Земли. Приуроченность их к зонам современного и недавнего вулканизма обуславливает постоянное поступление диоксида углерода из магматических очагов и постепенное насыщение им глубинных вод этих озёр. Другим условием для накопления в глубинах озера значительных запасов диоксида углерода является наличие устойчивой стратификации в водной толще, увеличение с глубиной потенциальной плотности воды, что препятствует возникновению конвективного перемешивания вод. Именно эти две особенности озёр: устойчивая стратификация водной толщи и поступление диоксида углерода с глубины – и сделали Ниос и Монун «озёрами-убийцами». Внезапный взрывоподобный выброс больших масс диоксида углерода, ранее растворённого в глубинных водах озёр, может быть вызван достижением насыщения этим газом вод озера или спровоцирован неким «спусковым механизмом».

Взрывоподобные выбросы больших масс газов, подобные произошедшим в озёрах Монун и Ниос, можно называть лимнологическими катастрофами или лимнологическими извержениями. Они имеют ряд принципиальных отличий от фреатических извержений, происходящих в горячих кратерных («гидросльфатарных») озёрах, где наблюдается выброс не только и не столько вулканических газов, но, прежде всего, воды, озерных илов и обломков ранее извергнутых пород. Фреатические извержения происходят при разогреве и вскипании озёрных или грунтовых вод вследствие внезапного соприкосновения их с захороненными в илах очагами расплавленной серы или с внедрившимся магматическим расплавом. В последнем случае за фреатическим извержением может последовать извержение магмы, как это произошло, например, при извержении вулкана Мон-Пеле в 1902 году или на вулкане Эбеко в ходе извержения 1934-1935 гг.

Лимнологические катастрофы, подобные случившимся в озёрах Монун и Ниос, не могут произойти в холодных кратерных и кальдерных озёрах умеренного пояса. В глубинных водах этих озёр диоксид углерода не может накапливаться в течение длительного времени, поскольку дважды в год, перед ледоставом и после таяния льдов, в этих озёрах происходит вертикальная циркуляция, полное перемешивание всего объёма воды.

Озёра Монун и Ниос, заслужившие недобрую славу «озёр-убийц», – лишь два из числа многочисленных озёр вулканического происхождения в тропической зоне Африки. Учёные обеспокоены также состоянием озера Киву, одного из Великих африканских озёр, расположенного в грабене Западного рифта Восточно-Африканской рифтовой системы. Это озеро находится на границе Руанды и Демократической Республики Конго.

Озеро Киву – одно из крупнейших озёр Африки. Его длина – 89 км, ширина – 48 км, площадь – 2700 км², объём – 500 км³. Наибольшая глубина – 496 м (16-е место по глубине в мире). Урез воды находится на отметке 1460 м над уровнем моря. В озере наблюдается температурная инверсия: тёплые поверхностный и придонный слои воды разделены холодным (Киву (Kivu), 2006). Однако вследствие высокой минерализации глубинных вод (4 г/л) в озере сохраняется устойчивая стратификация, и вертикальное перемешивание отсутствует. Температура верхних слоёв воды колеблется от 27 до 29°C, вода жёсткая, pH = 8,5–9,2.

Отличием озера Киву от других водоёмов как умеренного, так и тропического климата является отсутствие испарения на границе воды и воздуха. Из-за высокой температуры и 100-процентной влажности атмосферы над озером между водой и воздухом образуется своеобразная стабильная «подушка» горячего водяного пара (Урушев, 2009).

Газы, насыщающие нижние слои озера Киву, поступают из тёплых минерализованных источников, которые просачиваются через слои застывшей вулканической лавы и пепловых отложений. Количество накопившегося в озере диоксида углерода (приведенного к стандартным условиям) составляет 250 млрд м³, что примерно в тысячу раз больше, чем в озерах Ниос и Монун

вместе взятых (Озёра-убийцы, 2003, с. 81). Благодаря застоному характеру глубинных вод в анаэробном «мёртвом» слое озера (на глубинах ниже 270 м) растворено значительное количество метана, скопившегося здесь в количестве, отвечающем месторождению промышленного значения. Основной причиной появления метана в озере считают разложение органических остатков, скопившихся на дне озера.

В поверхностных слоях озера углекислого газа и метана растворено немного. Тем не менее, именно присутствием этих газов объясняют отсутствие в воде озера Киву простейших-паразитов и личинок комаров (комаров и москитов в окрестностях нет). Озеро Киву также единственный крупный водоём Африки, где нет крокодилов.

В последние 30 лет в озере Киву наблюдается увеличение количества диоксида углерода и метана; за 30 лет содержание метана выросло на 20% (Сокровища ..., 2010), и это вызывает тревогу у геологов (Баландина, 2009). Они опасаются, что скопившиеся и продолжающие накапливаться в озере Киву гигантские объёмы газов могут высвободиться и вызвать катастрофу.

Котловина озера расположена в рифтовой долине, которая постепенно расширяется и углубляется. Это сопровождается землетрясениями и извержениями вулканов в ближайших окрестностях озера. Кроме того, «следует учитывать, что этот водоём лежит непосредственно на активном рифте, так что расщелины в земной коре вполне могут широко раскрыться, дав выход вулканическим газам. Тогда, по подсчётам специалистов, последствия могут оказаться сравнимыми со взрывом атомной бомбы» (Озёра-убийцы, 2003, с. 81).

Это была бы ужасная катастрофа. Местность вокруг озера Киву – один из самых густонаселённых районов Африки. Здесь проживает более двух миллионов человек. Особенно многолюдно на северных берегах озера, где в 1994 году возникли лагеря беженцев, скрывающихся здесь от ужасов кровопролитной гражданской войны в Руанде.

Опасаются также, что нарушить стратификацию в озере и спровоцировать выброс газов из его глубин может извержение одного из ближайших вулканов. Однако лавовые потоки, которые достигали берегов озера, и магматофреатические взрывы, сопровождающие излияния лавы в озеро, приводили лишь к локальному разогреву поверхностного слоя воды и не вызывали нарушения стратификации водной толщи в озере. После почти каждого извержения вулкана Ньярагонго в озере Киву появлялся новый полуостров или мыс, рождались новые бухты и заливы, создавались прихотливые очертания его современной береговой линии. «В 2002 г. в воды Киву вторгся мощный поток лавы, который был извергнут ближайшим к озеру вулканом Ньярагонго; к счастью, он не нарушил стратификации слоёв воды» (Озёра-убийцы, 2003, с. 81). «Раскалённая лава спустилась в озеро, вскипятила его воду на расстоянии 40 м от берега и образовала длинный пустынный мыс» (Озёро Киву // Сайт «Разные ...»). В 1948 году произошло извержение расположенного рядом с озером вулкана Китуро. Лава излилась в озеро, вода в озере закипела, и обитавшая в нём рыба сварилась заживо. Местные жители даже

некоторое время питались варёной рыбой, вынимая её из озера (Урушев, 2009; Баландина, 2009; Озеро Киву // Википедия).

Учёные также беспокоились, что выброс газов из глубин озера могут вызвать землетрясения, которые часто происходят в Восточной рифтовой зоне. Однако даже когда «в 2002 году в 18 км от озера мощным землетрясением была уничтожена половина города Гома (ДР Конго), газ на дне Киву остался стабилен. ... Не меньшие опасения у учёных вызывают и совместные планы Руанды и Конго освоить промышленную добычу метана из озера Киву. По их мнению, это также может дестабилизировать газовые запасы и стать причиной разрушительного взрыва» (Урушев, 2009).

Запасы метана в озере Киву оценивают в 65 млрд м³, и правительство Руанды возлагает большие надежды на использование его в качестве источника энергии. «Недавно Руанда начала разрабатывать эти запасы, поставив в своих водах плавучую платформу типа применяемых для добычи нефти и газа в морях. С глубины 320 м ежечасно откачивают тысячу кубометров газа. На нём работает расположенная поблизости ТЭЦ мощностью 30 мегаватт. В планах – к 2013 году увеличить её мощность до 200 мегаватт, чтобы снабжать электроэнергией соседние страны. Запасов газа хватит, по меньшей мере, на сто лет» (Сокровища ..., 2010, с. 61). «Но на метане Киву могли бы работать целые отрасли тяжёлой индустрии. Правительство Руанды обратилось к соседним странам с предложением построить на кооперативных началах межгосударственный металлургический завод, где метан мог бы использоваться как восстановитель» (Озеро Киву // Сайт «Разные ...).

Литература

- Алексеева Г., Орлов В.* Штурм озера-убийцы // НЛО. 2001. № 23. С. 8–9.
- Баландина Е.* Озеро Киву – газовая бомба // Сайт «EcoVoice». 7 декабря 2009. URL: <http://ecovoice.ru/blog/eco/1078.html>.
- Дублянский В.Н.* Занимательная спелеология. Челябинск: Урал-LTD, 2000. 528 с.
- Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н.* Карстоведение: Уч. пособие. Часть I. Общее карстоведение / Пермский государственный университет. Пермь, 2004. 307 с.
- Ионина Н.А., Кубеев М.Н.* 100 великих катастроф. М.: Вече, 2001. 497 с.
- Камерунские озера грозят новой катастрофой // Природа. 1989. № 3. С. 120.
- Киву (Kivu) // Словарь современных географических названий / Под общей ред. акад. В.М. Котлякова. Екатеринбург: «У-Фактория», 2006.
- Озёра Монун и Ниос снова угрожают // Природа. 1995. № 5. С. 104-105.
- Озёра-убийцы // Природа. 2003. № 10. С. 80-81.
- Озеро Киву // Сайт «Разные страны. Разные народы. Разные явления природы. Разные факты нашей планеты». URL: http://www.raznyestrany.com/ozero_kivu.html (дата обращения: 29.02.2012).
- Озеро Киву // Википедия. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 29.02.2012).
- Озеро-убийца в Камеруне // Природа. 1986. № 10.
- Озеро-убийца в Камеруне: расследование завершается // Природа. 1993. № 6. С. 116-117.
- Псаломщиков В.* Долины смерти на картах мира // Мир приключений и путешествий: электрон. версия журнала. № 3. 2001. URL: <http://anomalija.kulichki.ru/text2/289.htm>

- Силкин Б.И.* Ниос, озеро-убийца // *Вокруг света*. 1993. № 4. С. 20-21.
- Силкин Б.И.* Тайна озера Ниос // *Юный натуралист*. 1987. № 6. С. 36–38.
- Следующая катастрофа на озере Ниос – не позже чем через 20 лет // *Наука и жизнь*. 1991. № 5. С. 94.
- Смерть приходит из озера (По материалам иностранной печати) // *Наука и жизнь*. 1987. № 2. С. 44–45.
- Сокровища озера Киву // *Наука и жизнь*. 2010. № 12. С. 60–61.
- Трагедия в Камеруне // *Природа*. 1987. № 4. С. 115-117.
- Угроза от озёр-убийц нарастает // *Природа*. 1999. № 11. С. 84-85.
- Укропление озера-убийцы // *Природа*. 2001. № 9. С. 29.
- Урушев П.* Озеро Киву – пресноводная бомба замедленного действия // Сайт «Правда.Ру». URL: <http://www.pravda.ru/science/planet/environment/24-11-2009/1000732-kivu-0/>
- Экспедиция на озеро Ниос // *Наука и жизнь*. 1990. № 9. С. 56.
- Эттингер И., Боярский В.* Две катастрофы – одна гипотеза // *Наука и жизнь*. 1988. № 2. С. 94–95.
- Kling G.W., Ewans W.C., Tuttle M.L., Tanyileke G.* Degasing of Lake Nyos // *Nature*. 1994. Vol. 368. № 6470. P. 405–406.

НОВЫЙ ЭКСПОЗИЦИОННЫЙ СТЕНД «РЕСУРСЫ МИРОВОГО ОКЕАНА»

К.С. Кузьминская, А.Н. Пантюлин

Одна из главных задач музея – это знакомство посетителей с достижениями современной науки. Музейная форма имеет большое преимущество перед другими способами распространения информации. Она основывается на образном показе материала (карты, космические снимки, рисунки, графика, натурные образцы и т.д.) и апеллирует не только к логическому мышлению посетителя, но и к его чувственному восприятию, что способствует более глубокому усвоению материала.

Музейная экспозиция призвана развивать у посетителя способность к самостоятельной оценке последствий вмешательства человека в естественный ход природных процессов. Новая экспозиция «Ресурсы Мирового океана» даёт возможность наглядно ознакомиться с особенностями распределения биологических ресурсов и понять, как нужно использовать природные богатства Мирового океана без разрушения сложившихся экосистем.

В последние десятилетия с помощью дистанционных методов впервые были получены глобальные карты продукционного потенциала океана, которые выявили высокую степень неравномерности распространения жизни в океане. Наибольшее значение имеют так называемые «сгущения жизни» – области локализации высокопродуктивных экосистем в определённых зонах Мирового океана. Они связаны, как правило, с областями контакта различных сред – с границами океана с атмосферой, побережьями, океаническим дном, участками соприкосновения водных масс разного происхождения и разных характеристик.