

О НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ИССЛЕДОВАНИЙ, РАЗВИВАЮЩИХ ИДЕЮ В. И. ВЕРНАДСКОГО О "ГАЗОВОМ ДЫХАНИИ" ЗЕМЛИ

В. М. Шестопапов^{1, 2}, А. Н. Макаренко²

Статья 1. ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПРИПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНОЙ ДЕГАЗАЦИИ

Обговорено проблеми і напрями сучасного розвитку ідеї В. І. Вернадського про "газове дихання" Землі в аспекті поверхневих і приповерхневих проявів дегазації. Показано шляхи міграції геофлюїдів і структури, які при цьому виникають на земній поверхні і в приповерхневому шарі. Дегазація Землі, зокрема через холодну її гілку, має значні масштаби.

Ключові слова: "газове дихання" Землі, поверхневі прояви дегазації, шляхи міграції геофлюїдів, западини.

The problems and current lines of development are discussed, concerning the V. I. Vernadsky's idea about "gas breathing" of the Earth, in particular, surface and near-surface manifestations of degassing. Paths of geofluids migration are shown, as well as structures resulting on the Earth surface and in the near-surface layer. Degassing of the Earth, particularly through its cold branch, is of considerable scale.

Key words: "gas breathing" of the Earth, surface manifestations of degassing, paths of geofluids migration, depressions.

Введение

Более 100 лет назад (в 1911 и 1912 гг.) [3, 5] В. И. Вернадский обосновал существование явления, названного им "газовым дыханием планеты", заключающегося в выходе летучих веществ к поверхности Земли вследствие дегазации ее недр. Результатом "газового дыхания" является наличие у нашей планеты внешних ее оболочек, состоящих из летучих – гидросферы и атмосферы.

В общих чертах можно говорить о двух ветвях дегазации. Во-первых, вполне очевидно извержение газов несколькими тысячами регулярно возобновляющих свою деятельность наземных и подводных вулканов. Несогласованность темпов ухода газов из атмосферы в сравнении с их поступлением вследствие вулканической деятельности показывает, что, помимо такого "горячего выдыхания Земли", существуют еще и "фоновая", невулканическая, менее заметная,

но, возможно, еще более масштабная форма дегазации планетных недр – "холодное выдыхание" Земли" [8, 14, 18].

Изучая геохимические особенности горных пород, В. И. Вернадский пришел к выводу о вероятном восстановительном характере самых глубоких сфер Земли в сравнении с вышележащими слоями и предположил решающую роль в этом водорода и его соединений: "Наши представления о термодинамических и химических условиях глубин нашей планеты заставляют нас видеть в них среды, благоприятные для существования водородных тел. Здесь активность химических реакций уменьшается, кислород быстро сходит на нет, начинают все более и более преобладать металлы типа железа и, по-видимому, растет количество водорода. В то же самое время температура и давление повышаются. Все это должно привести к сохранению в этих глубинах водородных соединений, и в том числе растворов водорода в металлах" [4, с. 13].

Идея В.И. Вернадского относительно вероятного значительного содержания соединений водорода в самых глубоких слоях земных недр и их важной роли в геологических процессах получила дальнейшее развитие в трудах отечественных и зарубежных специалистов – А. П. Виноградова, Н. П. Семеновенко, Н. А. Кудрявцева, В. Б. Порфирьева, П. Н. Кропоткина, Э. Б. Чекалюка, А. А. Маракушева, Ф. А. Летникова, П. Ф. Гожики, А. Е. Лукина, Д. Стевенсона, Б. М. Валяева, Г. И. Войтова, В. О. Краюшкина, А. М. Портнова, В. Н. Ларина, А. Е. Дмитриевского, О. Ступки, Е. Такаши, П. Джонеса, Г. Голда, А. Джиярядина, Е. Охтани, Ю. Шибазакки, Х. Терасаки и др.

Здесь мы попытаемся прежде всего обобщить имеющиеся сведения о проявлениях дегазации, зафиксированных на поверхности Земли и в относительно неглубоких частях земной коры, а затем о процессах мобилизации и преобразования газов на больших глубинах.

При этом в проблеме "газового дыхания планеты" мы, образно сравнивая Землю с живым существом, будем акцентировать наше и, разумеется, читателя внимание лишь на процессе "выдыхания", т. е. выхода газов с больших глубин к поверхности. Наши знания о "вдыхании" – т. е. миграции газов в глубь земной тверди – замыкаются в основном на приповерхностных средах и по своей значимости для эволюции планеты, безусловно, уступают процессу "выдыхания".

Поверхностные проявления аномальной холодной дегазации на суше

В связи с мелиоративными и сельскохозяйственными задачами аномальные пути фильтрации влаги и миграции различных веществ в почвах и зоне аэрации были предметом внимания многих исследователей в течение длительного времени. При этом рассматривались в основном небольшие неоднородности размером $n \cdot 10^{-3}$ – $n \cdot 10^{-1}$ м, и генезис их связывался с различными экзогенными процессами.

Более крупные аномальные образования – западины (рис. 1) (а также поды, блюдца и т. п.) с поперечным размером $n \cdot 10^1$ – $n \cdot 10^3$ м были описаны еще М. Ф. Ле-

ваковским в 1867 г. в Харьковской губернии [24]. О генезисе этих образований высказаны различные предположения. Так, И. П. Герасимов, Г. И. Воронова и другие ученые считали, что причиной их возникновения являются тектонические нарушения, осложненные суффозионными и карстовыми процессами. Большое значение в их образовании придавалось термокарстовым процессам (А. А. Величко, И. Г. Пидопличко, И. И. Молодых и др.). Полигенетические гипотезы их образования нашли распространение начиная с 80-х годов XX ст. (Ф. Н. Мильков, Ю. Г. Данцов, В. Н. Бублясь и др.).

Перед нашими исследованиями [23, 24 и др.], в связи с Чернобыльской аварией, первоначально ставилась задача максимально детального изучения роли западин в аномальном поглощении поверхностного стока и загрязнений геологической среды радионуклидами. В частности, было показано, что, несмотря на то, что суммарная площадь западин в Киевском регионе составляет 3–10%, питание подземных вод поверхностными через них может достигать 30–40%, а поступление загрязнений – до 40–60%. Уделялось внимание и генезису западин. В Киевской области влияние термокарста на формирование западин в большинстве случаев хорошо прослеживается. Но в южных районах оно постепенно исчезает. А в Бразилии, где западины также широко встречаются, термокарстовый фактор просто невозможен. Следовательно, термокарст не является повсеместной причиной образования западин.

Выполнение комплекса сопутствующих геофизических исследований [24] позволило выявить аномальные корни западин до глубин 50–60 м, а в отдельных случаях до кровли кристаллического фундамента (более 400 м). Было установлено, что в центральной части западин имеется обычно субвертикальная вытянутая зона рыхлых относительно более проницаемых пород (рис. 2). К ней нередко приурочена аномалия радона. У нижней части склона западины в пределах субгоризонтальной кольцевой зоны также зачастую прослеживаются измененные породы, к которым нередко приурочены проявления дегазации радона.

Установлено, что морфология поверхности западин обычно отражает степень их

эволюции. Были выявлены западины погребенные, отмирающие, стабильные и активно развивающиеся. Распространение западин характерно для равнинных слабо расчлененных территорий. По мере увеличения расчлененности местности овражно-балочной системой, которая обычно связана с геодинамическими процессами, количество и плотность западин резко уменьшаются вплоть до их полного исчезновения.

В ряде случаев прослеживается четкая или более завуалированная связь западин с разломной тектоникой, глобальной и локальной трещиноватостью (линейной разуплотненностью) подстилающих пород. Региональное выборочное изучение космоснимков различных стран и материков показало наличие крупных (субрегиональных) и локальных группировок (сгущений) западин. Так, наибольшее сгущение западин (до 10–15% площади выделенной территории) отмечается в пределах смежных территорий Киевской, Черниговской, Черкасской и Полтавской областей (рис. 3).

Вся эта территория приурочена к юго-западному борту Днепровско-Донецкой впадины. При этом западины расположены на различных террасах Днепра и водоразделе.

Южнее Конотопа Сумской области обнаружено скопление небольших западин, которые связаны между собой линеаменами в виде цепочек или сеток (рис. 4).

Иными словами, если исключить эрозионную расчлененность местности, то геоморфологические различия территории, возможно, вносят свои коррективы, но не являются определяющими в отно-



Рис. 1. Общий вид западины в окрестностях с. Беневка (зона отчуждения ЧАЭС) [24]

шении плотности размещения западин. В пределах той же Днепровско-Донецкой впадины обнаружены и более мелкие группировки западин, развитые в Харьковской области (например, вблизи городов Изюм и Балаклея), на севере Полтавской области.

Много скоплений западин на отдельных территориях обнаружено в Германии, Польше, Беларуси, США, Канаде, Аргентине, Бразилии. Интересные результаты получены группой В.Н. Ларина по России [15, 16]. Западины здесь обнаружены в различных областях (Московской, Воронежской, Липецкой, Волгоградской и др.). Но главное заключалось в том, что изученные западины

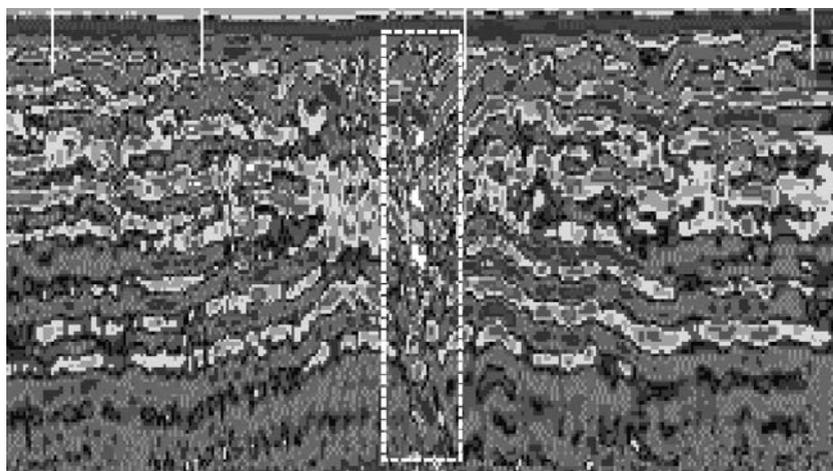
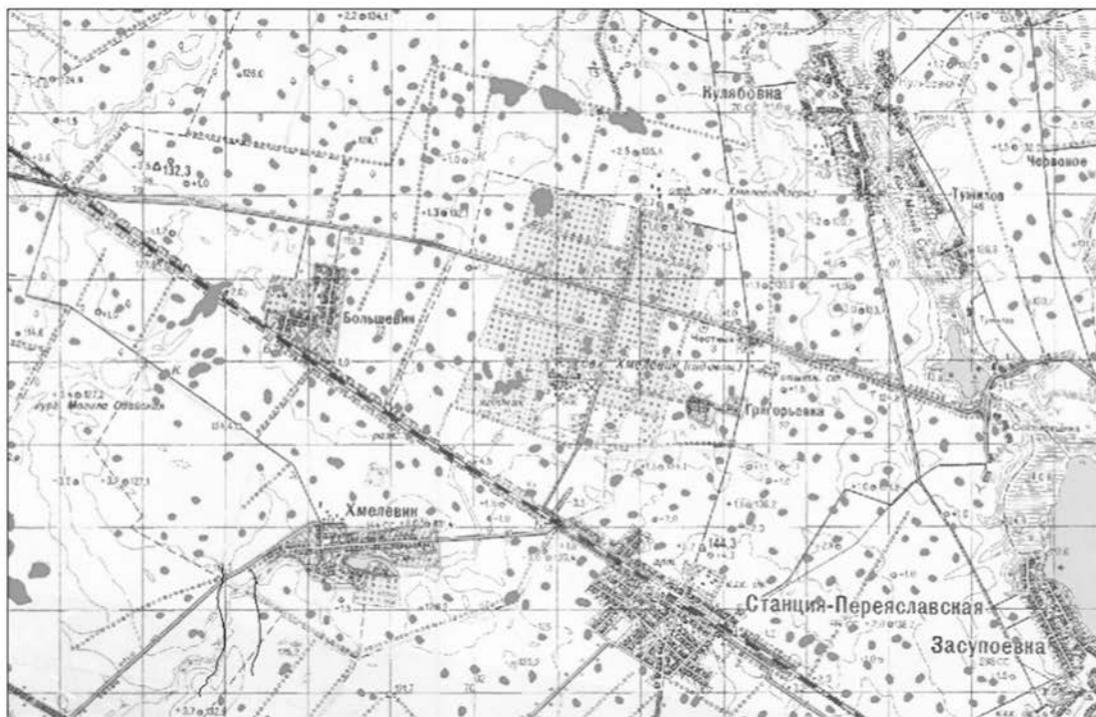


Рис. 2. Георадарный разрез с аномальной зоной под западиной [24]



А



Б

Рис. 3. Распространенность западин в юго-восточной части Киевской области: А – проявления западин на топокарте, Б – проявления западин на космоснимке

газировали водородом, измеренная концентрация которого достигала 1,5–1,7%, а предполагаемая реальная могла составлять 2,0–2,5%. Авторы этого интересного исследования отметили, что в период 2007–2008 гг. был обнаружен тренд роста концентраций водорода. Был также отмечен эффект уничтожения водородом органики почв в виде кольцевого их выбеливания [15, 21] и угнетения растительности (рис. 5). Аналогичный эффект обнаружен и на ряде западин Украины.

Примененный этими авторами метод микросейсмического зондирования позволил выявить под одной из западин канал диаметром 350 м, уходящий на глубину более 7 км (рис. 6). Поглощение микросейсмических волн и уменьшение их скорости прохождения свидетельствуют о высокой пористости (скважности) тела канала, заполненного флюидами. Как и в других случаях, в центре этой западины концентрация водорода в почвенном воздухе достигала 1,6%.

Отмеченные выше и многие другие исследования свидетельствуют о том, что в пределах равнинных территорий значительная часть западин (а также поды, блюдца и т. п.) являются прежде всего поверхностными проявлениями глубинной дегазации Земли. Конечно, последующие процессы влияют на эволюцию западин, определяют их аномальную роль в вертикальном массообмене не только в связи с дегазацией недр. Было, в частности, установлено [23], что в западинах происходит аномальный процесс перевода части твердого вещества пород в миграционно активную форму и транспортирование его с

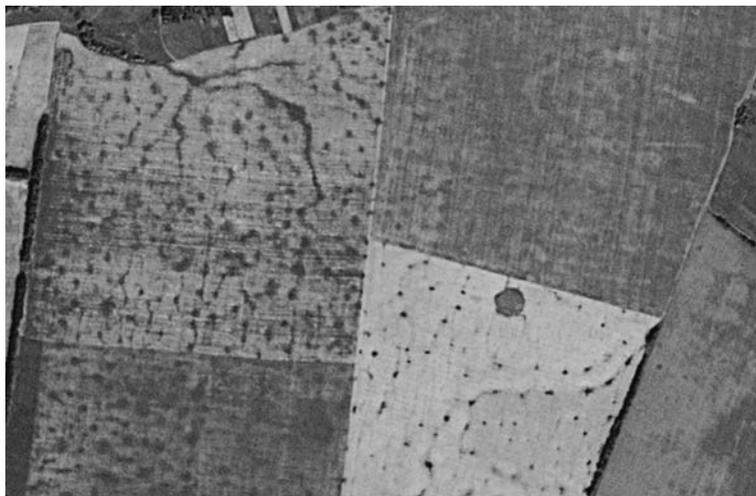


Рис. 4. Западины в Сумской области. Видна связь западин с линейными зонами

интенсивно (по сравнению с фоном) формирующимися подземными водами в геологическую среду. Отмечено также, что химический состав грунтовых вод западин и фоновых отложений не идентичен в связи с различной активностью взаимодействия в системе вода – порода.



Рис. 5. "Водородное выбеливание" гумуса в черноземах [15] (лесопосадки и черноземное поле в северо-восточном пригороде г. Липецк; диаметры кольцевых структур – от 100 до 250 м, глубина – не более 4 м)

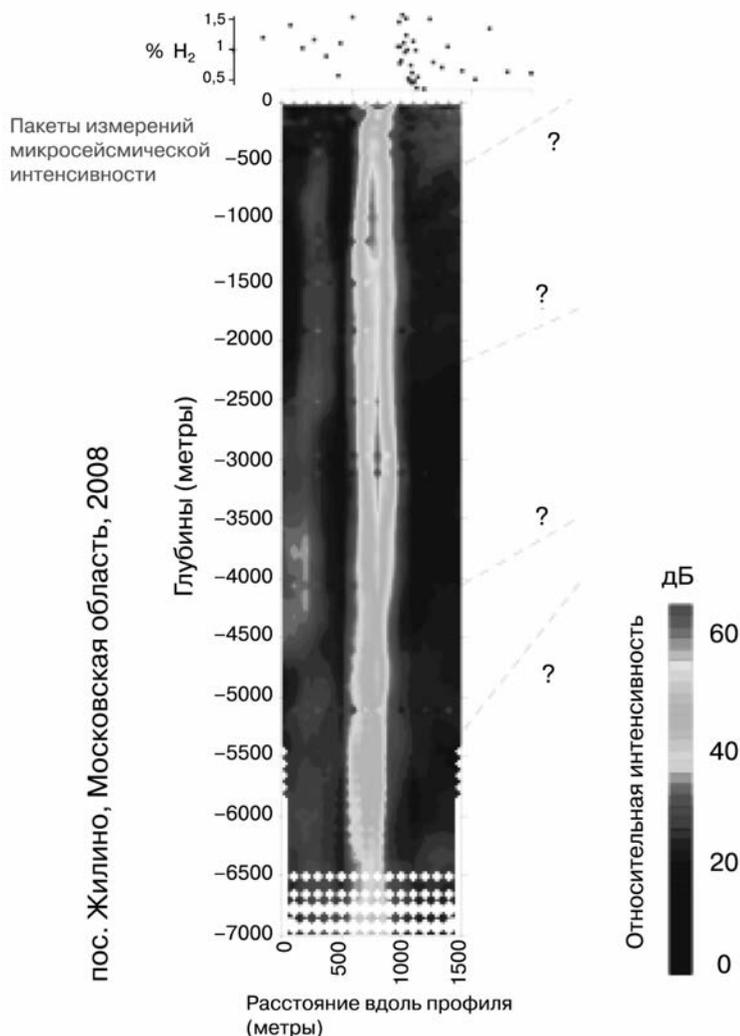


Рис. 6. Результаты исследований подзападинного канала дегазации (газовой трубы) [15]

Можно предположить, что цикличность процессов нисходящего (экзогенного) и восходящего (эндогенного) массообмена в западинах происходит в противофазе. Увеличение концентрации газа (водорода, метана и др.), по-видимому, существенно увеличивает подъемную силу газо-водной смеси и, возможно, приводит ее к эффекту "эрлифта". В результате не только усиливается выделение газа из западин, но и происходит подъем более метаморфизованных глубинных вод в залегающие выше водоносные горизонты по подзападинным вертикальным каналам миграции.

В периоды спада активности газовыделений должно происходить увеличение вертикального нисходящего движения подземных вод и растворенных в них веществ. Именно такой эффект был обнаружен после Чернобыльской аварии, когда спустя короткое время аварийные радионуклиды были обнаружены в подземных водах на глубинах 200–320 м. Объяснение этому феномену может быть дано лишь при условии признания вертикальных аномальных путей фильтрации и миграции.

Следует также учитывать, что нисходящая ветвь водообмена подчинена общим гидродинамическим закономерностям этажно залегающих взаимодействующих водоносных горизонтов и лишь усилена повышенной проницаемостью соединяющих их подзападинных вертикальных каналов. В восходящей же ветви массообмена газо-водная смесь в связи с ее высокой подъемной силой преодолевает гидрогеодинамические силы системы, периодически нарушая устоявшиеся связи между ее элементами. В результате следует ожидать периодического развития восходящих газогидрохимических и газогидродинамических аномалий.

На упомянутых участках и в ряде других областей Украины было обнаружено, что местами отдельные западины образуют полные или незамкнутые цепочечные кольцевые структуры (рис. 7). По-видимому, формирование таких западин происходило из одного газового очага. По мере приближения газа к поверхности он разделялся на отдельные газовые струи, в результате чего возникшие под влиянием этих струй западины сохраняли в той или иной мере округлую форму поперечного контура газового очага.

Не так однозначна и проблема формирования многочисленных проявлений термокарста. Анализ космоснимков северных

приморских равнинных районов Сибири свидетельствует не только о массовом развитии западин термокарстового генезиса, но и о некоторой их упорядоченности, ориентировке их групп. По-видимому, глубинный геодинамический фактор и связанный с ним процесс дегазации играли определяющую роль в зарождении термокарста и формировании здесь многочисленных термокарстовых западин.

Вероятно, имеет право на проверку и гипотеза В. Н. Ларина о газово-геодинамическом факторе формирования феномена многочисленных (общим числом около полумиллиона) западин Каролина Бейс на востоке США, аналогичном условиям севера Сибири (рис. 8).

Судя по нынешнему состоянию значительной части наблюдаемых западин, мож-



Рис. 7. Цепочечные кольцевые структуры западин

но предположить, что их массовое возникновение, возобновление и развитие, обусловленное существенным ростом и проявлением дегазации, связано с деградацией оледенения. Освобождение обширных территорий от давления ледника и деградация мерзлоты грунтов, игравшей барьерную

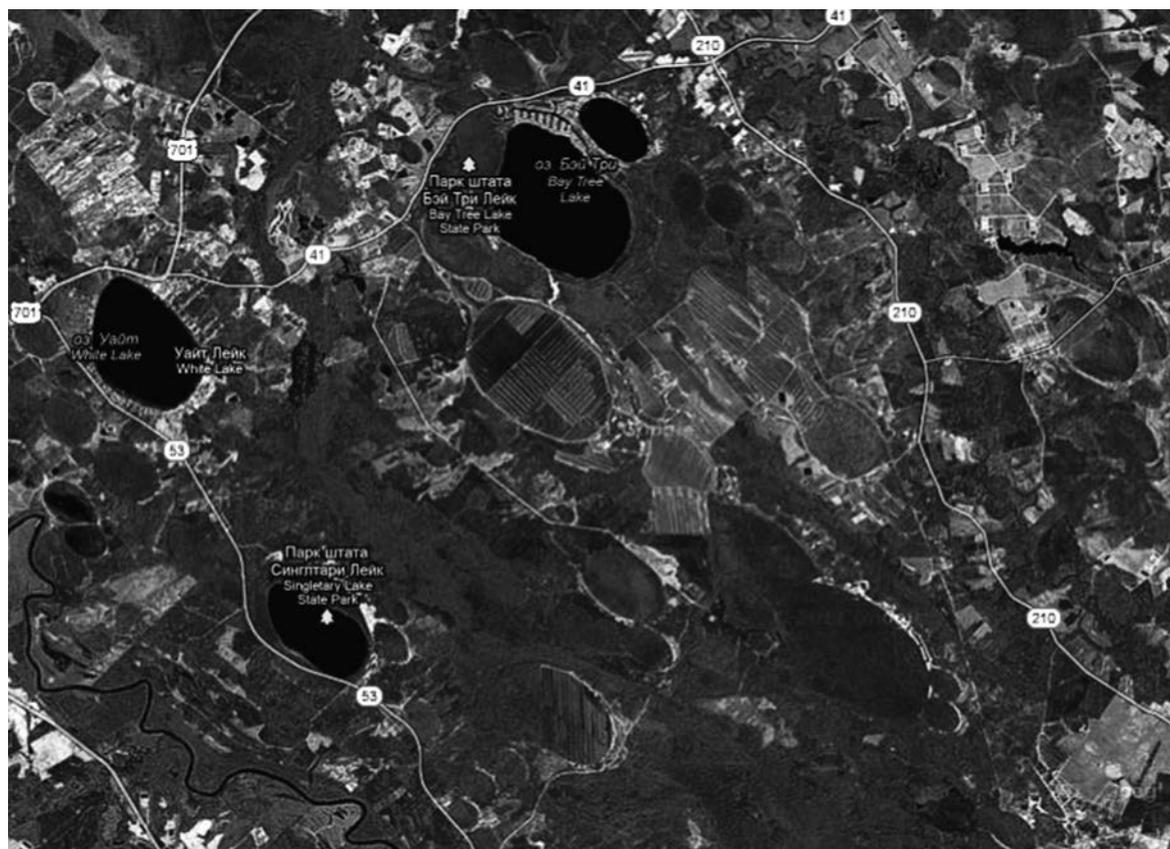


Рис. 8. Западинные формы рельефа Carolina Bays на восточном побережье США

роль в отношении глубинной дегазации, приводили к перераспределению напряжений на пространствах, существенно превышающих ареалы распространения оледенения, к некоторому разуплотнению отложений и увеличению их проницаемости. В дальнейшем периодическая активизация дегазации и развития западин, по-видимому, тоже происходила, но она уже не имела такого массового и интенсивного характера.

Можно предположить, что и после деградации более ранних оледенений возникали наиболее значительные проявления дегазации, следы которых, вероятно, можно найти в соответствующих по возрасту отложениях. Признаки периодической активизации дегазационного процесса обнаруживаются по вторичным морфологическим формам западин. О современной активизации рассредоточенной дегазации недр по западным формам рельефа свидетельствуют и результаты наблюдений группы В. Н. Ларина.

Иные поверхностные проявления аномальной дегазации

Явления дегазации зафиксированы не только в виде образования западин. В. Н. Лариным и его коллегами были обнаружены на территории Московской области многочисленные холмики весьма пористой земли высотой до 0,5 м. Насыщенность почвы этих холмиков необычно крупными порами достигает 40–50%. Все они обусловлены сосредоточенными интенсивными выходами газа.

Более мощные всплески газовыделения, приведшие к образованию смеси гремучего газа (водорода более 4% в воздухе) и взрывам разной мощности с образованием крупных взрывных воронок, оптически, звуковыми, сейсмическими эффектами, были отмечены этими же авторами в г. Сасово Рязанской области (объемно-вакуумный взрыв мощностью около 30–50 т тротила с образованием воронки диаметром 28 м, произошедший в 1991 г.), у с. Ушаково и вблизи пос. Фатеж Курской области (1999 г.), в окрестностях Курской АЭС (две воронки диаметром 7–8 м и глубиной 3 м) в 1994 г., вблизи г. Марлен (Франция) в 1967 г. и др.

В пределах той же тектонически слабоактивной Восточно-Европейской платформы и во многих других местах неоднократно наблюдались случаи спорадического нагрева подземных вод, следы возгорания растительности явно эндогенной природы, выбросы пламени, необычные свечения в атмосфере, случаи точечного выпадения осадков при ясной погоде, некоторые аномалии экологического характера, которые, вероятно, связаны с активным выходом газов из земных глубин.

Безусловно, дегазация происходит не только по точечным, сосредоточенным или каналным путям. Имеется достаточно много данных, свидетельствующих о дегазации и повышенном флюидообмене по линейным геодинамическим зонам. В овражно-балочной системе, контролируемой геодинамической системой линейных напряжений и растяжений, во многих случаях фиксируются аномальные проявления радона, гелия. А судя по выбеливанию гумуса вдоль бортов этих форм, можно предположить и о дегазации водорода.

Интересные результаты получены при анализе аварийности газовых сетей в г. Одесса [22]. Было установлено, что значительная часть аварий происходит не в связи с техническим состоянием газового хозяйства, а под влиянием геодеформационных процессов вдоль тектонических нарушений в земной коре. Выполненные здесь наблюдения за выделением газов показали совпадение с периодами повышенной аварийности газовых систем выделения газов глубинного естественного происхождения, свидетельствующего о периодическом увеличении раскрытости недр на значительные глубины. Выявлено, что повышенная аварийность и выделение естественных газов связаны с:

- сезонными периодами (май – июнь и октябрь – декабрь), обусловленными внутригодовыми изменениями скорости вращения Земли;
- крупными землетрясениями в смежных регионах (скачок аварийности в десятки раз выше фоновых и весьма активное выделение природных газов).

В частности, землетрясение в Турции спровоцировало мощное выделение газов в русле р. Дунай, протекающей по крупному разлому.

Таким образом, наблюдения за динамикой эманации газов литосферы могут с успехом использоваться для диагностики активизации геодеформационных процессов.

Проявления аномальной дегазации в океане

Развитие исследований в области морской геологии привело к массовому выявлению прямых и косвенных следов дегазации на обширных морских просторах.

Весьма интересными объектами изучения оказались так называемые покмарки (англ. – rockmarks – оспины, выбоины) (рис. 9). По своей конфигурации и размерам они близки к западинам на суше. Учитывая их генетическое единство, о чем сказано ниже, будем их также называть устоявшимся термином – западины.

Впервые донные западины были исследованы у берегов Новой Шотландии (Канада) в 60-х годах XX ст. (Lew King, Brian McLean). В последнее время они были обнаружены в больших количествах в Атлантическом океане у берегов Западной Африки [30], северо-западнее Иберийского полуострова [27], у восточного побережья Канады [25], в Средиземном море близ устья р. Нил [28], в Чукотском море [17] и во многих других местах.

В районе восточных эстуариев Канады выявлено 7470 западин в рыхлых голоценовых отложениях. Было установлено, что глубина западин (y) связана с мощностью голоценовых отложений (x) корреляционной зависимостью $y \approx 0,4 x$ при коэффициенте корреляции 0,6. R. Pilchen, J. Argent [30] обобщили данные 57 публикаций и получили логарифмическую зависимость между диаметром и глубиной западин. Средняя статистическая оценка диаметра составляет 128 м, а глубина 9,6 м. При небольших наклонах дна распределение западин имеет внешне хаотический характер. С увеличением уклонов их расположение становится более упорядоченным (рис. 9). Они образуют цепочки, вытянутые

в стороны опускания дна, которые со временем сливаются в выровненные ложбины, не связанные с выносом обломочного материала с суши. Иногда в хаотическом распределении данных западин и на слабонаклонных участках улавливается линейное расположение отдельных их групп.

На одном из участков было осуществлено сейсмическое профилирование. Установлено, что западины располагаются в 200–600 м от линий разломов. Результаты сейсмических исследований свидетельствуют о том, что корни западин упираются в наклоненные в их сторону разломы.

Наблюдается отчетливая привязка эпох активного формирования западин к временам климатических перестроек смены эпох максимального оледенения на межледниковые эпохи потепления климата [32].

Имеются различные модели формирования донных западин. Согласно одной из них, образование западин связано с субмаринной разгрузкой подземных вод, движущихся по водоносным слоям со стороны суши. По-видимому, отдельные западины действительно могут иметь такой генезис. Но, учитывая их колоссальное количество при самых разнообразных, в том числе не благоприятных для субмаринной разгрузки структурно-гидрогеологических условиях, более обоснованной представляется модель их газового (газово-флюидного) генезиса. Эта модель подтверждается результатами сейсмического профилирования в ряде регионов.

В частности, у берегов Западной Африки [30], в Норвежском море [26] и многих

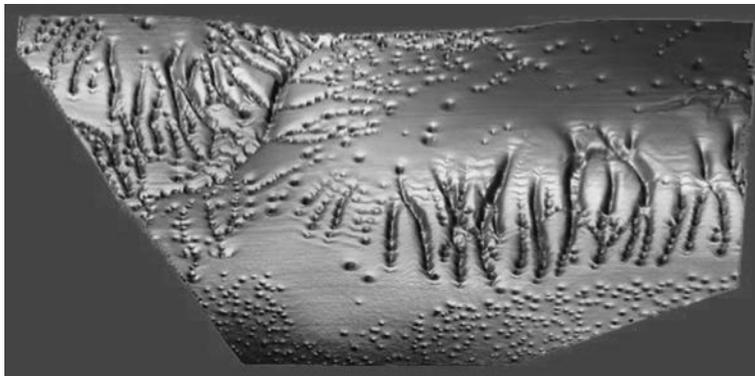


Рис. 9. Трехмерная визуализация строения поверхности морского дна у побережья Западной Африки [30]. Видны поля и цепочки западин на континентальном склоне

других местах было установлено, что под западинами обычно находятся вертикальные газопроводящие каналы (трубы), уходящие на большую глубину.

В работе [26] описан следующий вероятный механизм образования данных структур. Движущийся по капиллярам из земных

глубин газ встречается на своем пути со слоем пониженной проницаемости, что может быть, например, результатом кристаллизации газогидратов, и накапливается под ним. По достижении некоторого давления, достаточного для прорыва вышележащего газонепроницаемого слоя, этот прорыв проис-

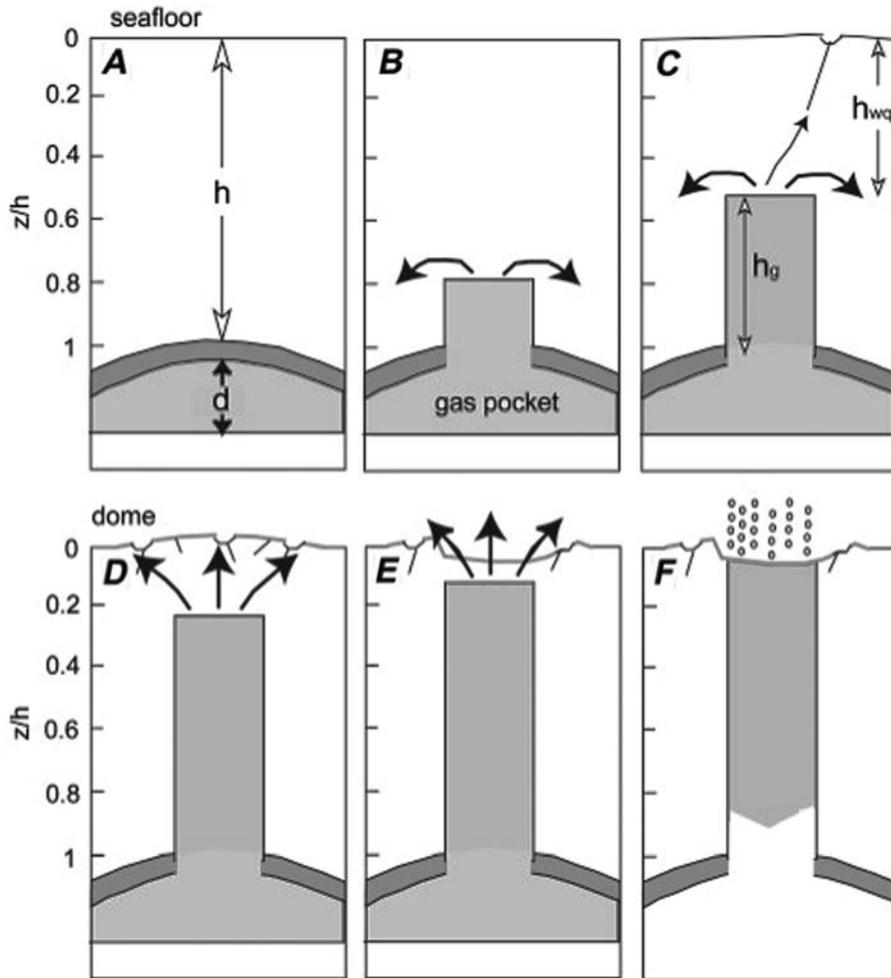


Рис. 10. Стадии формирования газовой трубы и донных западин [26]: *A* – под слабопроницаемым слоем (обозначен темно-серым цветом) скапливается некоторый объем газа, обладающий достаточной плавучестью, и под воздействием гидростатических сил насыщенная газом смесь начинает приподнимать и продавливать вышележащий слой; *B* – формирующийся газовый диапир вклинивается в вышележащую осадочную толщу, образуя там вначале "газовый карман" (gas pocket), выжимая при этом из выдавливаемой толщи воду; *C* – когда диапир достигает примерно половины своего пути к поверхности морского дна (seafloor), над ним начинают появляться первые мелкие западины; *D* – по мере подъема диапира поверхность дна вспучивается и покрывается более обширной сетью мелких западин; *E* – растущие западины сливаются в одну крупную западину; *F* – выход диапира к поверхности сопровождается его активной дегазацией. Цикл формирования газовой трубы завершен

ходит и формируется газовая труба (gas chimney). Поднимающийся газ, выдавливая собой воду, нарушает целостность межзерновых контактов в осадочном слое и часть зерен в виде суспензии устремляется вместе с потоком. Вблизи поверхности морского дна над газовой трубой осадки в значительной мере разжижаются и становятся более уязвимыми к вымыванию придонными течениями. Результаты численного моделирования формирования газовых труб и донных западин над ними показаны на рис. 10.

В некоторых других работах указывается также на возможную эрозию грунта исходящими газовой струями, разрыхляющими и взмучивающими донные отложения.

В ряде случаев было выявлено выделение газа непосредственно из донных западин (рис. 11). Данные газовой выделенности классифицированы как холодные метановые сипы (факелы). Они содержат главным образом метан (от 61,0 до 99,0%), а также азот (до 20,0%), углекислый газ (до 10,0%), водород (до 2,5%), гомологи метана (до 4,7%) и следовые количества сероводорода.

Нередко в пределах материковых склонов, у кромки шельфа на глубинах в основном до 800 м обнаруживаются газовые факелы. Их высота обычно варьирует в пределах 200 м. Не достигая поверхности воды, они обычно диффузно распыляются в ее толще.

Зафиксированы и аномальные факелы. Например, в Тихом океане обнаружены мощные факелы диаметром 25 км, которые поднимаются со дна на высоту до 2,5 км и более.

Вероятно, периодические выбросы газов через всю водную толщу характерны для района Бермудского треугольника. Экспериментально было подтверждено, что такие выбросы приводят к потере плавучести и гибели судов.

Газогидраты

Высказывались предположения, что во многих случаях существование факелов связано с деградацией газогидратов, весьма широко распространенных в придонных отложениях морей и океанов. Как известно, метановые гидраты представляют собой водяной лед, внутри кристаллической ре-

шетки которого находится большой объем этого газа. Газогидраты благодаря распространению вечной мерзлоты развиты также в приполярных пространствах суши.

Подсчитано, что запасы метана в газогидратах составляют около $2 \cdot 10^{18}$ м³ [1], что значительно превосходит запасы всех остальных форм углеводородов вместе взятых. Учитывая, что в исследованных регионах Мирового океана и на равнинных приполярных территориях распространено огромное количество западин, значительная часть которых имеет глубокие корни в виде газопроводящих каналов (gas chimneys), можно предположить, что эти каналы, а также линейные зоны глубинных разломов были основными поставщиками метана из недр планеты для формирования и пополнения его запасов в образованиях газогидратов [35]. В случае развития газогидратов и закупоривания газопроводящих каналов происходит накопление подгидратного газа, формирование его месторождений.

С точки зрения создания "парникового эффекта" в атмосфере метан является примерно в 50 раз более эффективным газом, чем углекислый газ. Поэтому даже незначительное повышение его концентрации в атмосфере может способствовать потеплению климата. Последние исследования неглубоких полярных морей свидетельствуют о критическом повышении температуры дна, начале разложения газогидратов и выделения метана в воду, а затем в атмосферу. По мнению ряда исследователей [10], могут развиваться различные сценарии деградации газогидратного слоя, в том числе и катастрофические для климата и современной экосистемы планеты.

Грязевые вулканы

Более интенсивные длительно существующие нередко взрывные выходы углеводородов и других глубинных газов на поверхность фиксируются в грязевых вулканах. По сути, грязевые вулканы – это путепроводы углеводородсодержащих флюидов с достаточно больших глубин активных геодинамических зон. Транспорт грязевого материала, который мы наблюдаем в таких вулканах, осуществляется газо-флюидной смесью, вырывающейся под большим дав-

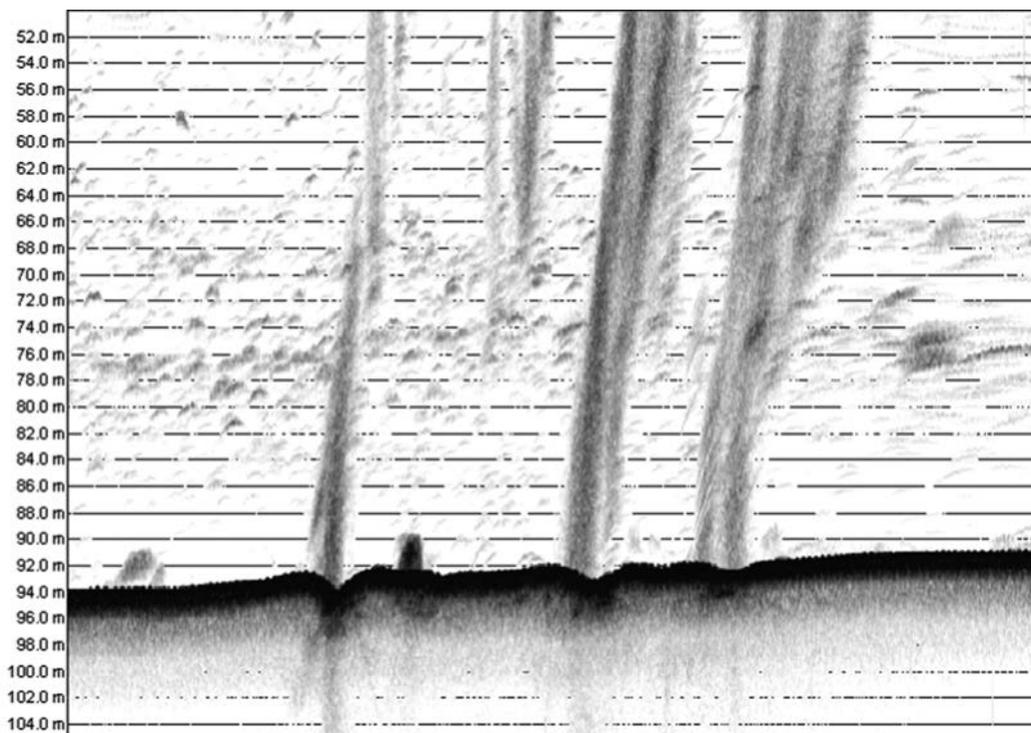


Рис. 11. Струйные газовыделения из донных западин в районе палеodelты р. Днепр в Черном море [11]

лением со значительных глубин. Из приблизительно 1700 известных грязевых вулканов в мире около 350 обнаружены в Восточном Азербайджане и примыкающем районе Каспия. По данным сейсморазведки, их корни зафиксированы на глубинах до 20 км и более. По существу, эта мощная группа грязевых вулканов входит в единую систему скоплений нефти и газа южнокаспийско-азербайджанского региона. По данным З. А. Буниатзаде, грязевые вулканы Восточного Азербайджана за последний миллион лет вынесли на поверхность не только огромную массу грязевулканической брекчии, но и коррелирующие с ней по объему не менее 175 трлн м³ метана. Для сравнения следует подчеркнуть, что разведанные и прогнозные запасы газа на этой территории составляют лишь доли процента от величины дегазации через грязевые вулканы. Иными словами, они являются слабым следом, побочной относительно тупиковой ветвью общей дегазации в этом регионе. В целом, грязевые вулканы распространены в основном в зонах субдукции и коллизии литосферных плит – Альпийско-Гималайском поясе и Тихоокеанском огневом кольце, а

также в таких областях спрединга, как Байкальская рифтовая зона.

О газах холодной дегазации

Газы холодной дегазации менее сконцентрированы, более рассредоточены и потому менее изучены. Если ориентироваться на состав газов грязевых вулканов и газовых струй, исходящих со дна морей и океанов, где этот процесс наиболее заметен и изучен, можно заключить, что основу холодной дегазации составляет метан. Данные по составу газов кимберлитовых трубок (диатрем), выработок некоторых месторождений отдельных западин в ряде случаев указывают на значительный вклад водорода и азота. Имеются признаки выхода значительных количеств CO₂, а также CO и некоторых других газов. Весьма вероятен преобладающий вклад ювенильной воды.

В целом, газы холодной ветви дегазации характеризуются значительно более восстановленным составом. Степень восстановленности повышается от складчатых поясов к платформам. Для горячей же ветви дегазации более характерны окисленные газы.

Высказывались предположения, что исходный восстановленный глубинный флюид подвергается окислению в приповерхностных условиях магматических очагов. Вне вулканических очагов окислительный процесс, очевидно, значительно менее развит.

Относительно соотношения объемов холодной и горячей ветвей дегазации можно предполагать сопоставимые их объемы. Следует иметь в виду, что холодная дегазация является процессом тихим, незаметным и мало привлекающим внимание, но зато повсюду распространённым, происходящим буквально у нас под ногами. В частности, установлено, что углерод в атмосферу поступает преимущественно (на 70%) в виде метана (которого мало в вулканических газах и который составляет основу холодной дегазации), а не углекислого газа (обильно выделяющегося в ходе вулканической деятельности), и лишь впоследствии окисляется [6]. Причем на 80% этот поступающий в атмосферу метан имеет глубинное происхождение.

Немаловажен вопрос о современной стадии и темпах дегазации.

Предполагаемый возраст Мирового океана равен примерно 4 млрд лет [7]. Вероятно, именно к этой эпохе относится начало активной дегазации нашей планеты. С тех пор в среднем выделялось $0,75 \cdot 10^{15}$ г/год воды [12]. При этом современные темпы водной дегазации составляют $0,25 \cdot 10^{15}$ г/год, т. е. процесс дегазации с ходом времени замедляется.

Поскольку главным компонентом газов (на заключительных этапах дегазации) как в условиях горячей, так и, вероятно, холодной дегазации является вода, по ее содержанию в гидросфере и более глубоких оболочках можно судить о том, какой стадии достиг дегазационный процесс на Земле в настоящее время.

Имеющиеся оценки содержания воды в земных оболочках весьма противоречивы. Согласно данным работы [12], исходное содержание воды в земных недрах составляло $4 \cdot 10^{24}$ г. Из них примерно $1 \cdot 10^{24}$ г остается в настоящее время в мантии, а $3 \cdot 10^{24}$ г было дегазировано. Причем около $2 \cdot 10^{24}$ г из последних составляют воды гидросферы и подземные воды земной коры, а еще $1 \cdot 10^{24}$ г диссипировало в космическое простран-

ство. Исходя из этого, должно было бы следовать, что, по крайней мере, в отношении водной дегазации (которая в конечном счете преобладает) наша планета находится на достаточно зрелой стадии, переходящей в заключительную.

Однако существуют и другие оценки относительно современного содержания воды глубоко в земных недрах. В последние годы, основываясь на результатах сейсмических исследований, состава минералов в кимберлитовых трубках, поведении минералов при высоких давлениях и температурах, некоторые исследователи стали говорить о возможности существования огромных масс воды в мантии, оценивая общий объем воды, там находящейся, величиной около 10–30 наземных океанов. В качестве водовмещающего минерала часто называют Mg-силикаты, в частности вадслеит [36] – минерал, составляющий значительную часть мантийного вещества. По оценкам, вадслеит может содержать до 3,1% воды в условиях мантии. Если справедливы такие оценки, то большая часть летучих все еще находится глубоко в земных недрах и в таком случае процесс дегазации еще далек от завершения.

Вторым по значимости компонентом дегазации является двуокись углерода и другие углеродсодержащие газы. Известно, что в ходе эволюции Земли во флюидных системах происходило увеличение соотношения Н/С [2], т. е. углеродсодержащие флюиды более быстрыми темпами исходили из земных недр и, следовательно, большее их количество было дегазировано.

Отметим также, что ускоренный выход углеродсодержащих соединений при более высокой, в целом, подвижности водорода может свидетельствовать о больших глубинах нахождения водородного резервуара в сравнении с углеродным.

Вулканы

Безусловно, самыми грандиозными проявлениями горячего газового "выдыхания" планеты являются вулканы. Более 600 вулканов, действующих в историческое время, зафиксировано на суше. На морском дне их во много раз больше. Достаточно отметить, что в пределах Тихого океана их выявлено

более 10 тысяч! Большинство островов Тихого океана имеют вулканическое происхождение. Такие крупные острова, как Гаити в Тихом океане и Исландия в Атлантике, возникли и продолжают расти вследствие современных вулканических извержений.

Об активности вулканов судят по объемам лавы и пепла. Но еще А. Ритман [19] в 1964 г. отметил, что вулканы – это прежде всего пути выхода газов из земных глубин. Объем извергающихся из вулканических жерл газов во многие тысячи раз превышает объемы твердой фракции. Конечно, в процессе подъема газов по вулканическим каналам их состав в значительной мере претерпевает изменения. Но все же о глубинной составляющей вулканических газов, которые являются основной движущей силой жизнедеятельности вулканов, сведения собраны. На подготовительной стадии и во время извержений наблюдались вспышки пламени, свидетельствующие о горении исходящих из жерла газов. Исследования показали, что преимущественно это водород и, отчасти, метан. Как отмечает А. М. Портнов, в 1954 г. над вулканом Шивелуч на Камчатке возник язык синего пламени высотой 20 км. Последующий взрыв выбросил вулканические глыбы массой 500–700 т на 10–12 км от жерла вулкана. Выброс водорода оценивается в десятки тысяч кубических километров. Выдающийся вулканолог Гарун Тазиев неоднократно наблюдал в различных местах выделяющиеся из раскаленной базальтовой лавы горящие пузыри различных размеров вплоть до 200 м в диаметре. В измененном поверхностном газе вулкана Этна удалось замерить до 16,5% остаточного водорода. Кроме того, в непосредственной близости от вулкана находятся месторождения углеводородов, и еще А. Гумбольдт наблюдал их следы в продуктах вулканических извержений.

Как известно, наибольшая вулканическая активность отмечается в пределах так называемого "огненного кольца" вокруг Тихого океана и срединных океанических хребтов. Согласно обобщению, выполненному сотрудниками РАН под руководством С. В. Белова, вулканы по газонасыщенности извержений можно подразделить на три типа. Первый – гавайский тип вулканов характеризуется излияниями базальтовой, текучей, весьма бедной газами лавой. Этот тип

характерен для океанической коры горячих точек, расположенной над плюмами либо в рифтовых зонах. По-видимому, источник тепла, формирующего базальтовый расплав, расположен неглубоко в океанической коре и воздействует лишь на базальтовый слой. При этом сам источник имеет локальный характер и высокую активность. Предположительно создание высоких температурных условий осуществляется вследствие окисления водорода при увеличении активности кислорода. Глубинное окисление водорода приводит к образованию текучести лав гавайского типа.

Вулканы второго типа – островных дуг и зон субдукции – расположены на границе океанической и континентальной коры. Кроме базальтов, здесь распространены андезитовые, дацитовые, риолитовые лавы, туфы, туфобрекчии. Источником водорода могут быть и астеносферные потоки и гидролиз воды при серпентизации мантийных пород в зоне субдукции. Лава здесь богата газами. К такому типу относятся вулканы Камчатки и Курильских островов, Японии, Стромболи вблизи Италии и др.

К третьему типу самой высокой газонасыщенности относятся вулканы, приуроченные к зонам наиболее активной субдукции. Извержения здесь имеют характер катастроф. Объем выброшенного газа в отдельных случаях составлял десятки и сотни тысяч кубических метров. Наиболее мощные извержения наблюдаются в зоне поглощения островных дуг с мощной гранитной корой. Это районы Индокитая, юго-западной части Тихого океана. К ним относятся супервулкан Тоба, вулканы Тамбора и Кракатау. Именно в районе сочленения Евразийской, Австралийской и Тихоокеанской плит отмечается наибольшая активизация мантийных газов. К этому же типу относится и супервулкан в Йеллоустонском национальном парке (США).

Для вулканов третьего типа характерно сохранение сверхвысокого давления мантийных газов (100 кбар и более) до самой поверхности. Мгновенное окисление сверхсжатого водорода в жерле и атмосфере приводит к грандиозному взрыву. Объем выброшенного газа во время извержения Кракатау достиг 100 трлн м³. Этот объем в 50 раз превышает объем годичной добычи газа на Земле!

На сейсмических разрезах через вулканы Камчатки от наклоненной зоны Беньюфа на глубине 100–200 км обнаруживаются вертикальные структуры, проявляющиеся очагами землетрясений на разных глубинах. На поверхности такие своеобразные вертикали заканчиваются жерлами вулканов. Очаги землетрясений, по-видимому, не что иное как ступки водородного газа, периодически частично взрывающиеся и перемещающиеся все ближе к поверхности. Судя по результатам наблюдений за Ключевским вулканом, скопления эпицентров землетрясений периодически перемещаются с глубины 30 км за 1–2 месяца к поверхности вулкана. По мере приближения сейсмического "узла" к поверхности растет прижерловая сейсмичность, наблюдается горение газа над кратером.

В заключение вместе с упомянутым авторским коллективом и другими исследователями можно сделать следующие выводы:

- Вулканизм обусловлен глубинной дегазацией Земли.

- Ведущим глубинным газом является водород.

- Лавовые расплавы в вулканических структурах возникают: а) за счет глубинной энергии молекуляризации водорода по схеме $H + H = H_2 + Q$; б) за счет приповерхностной энергии окисления водорода в вулканических структурах с образованием паров воды.

- Состав лав является индикатором глубинности окисления водорода: риолит-дацитовые лавы.

- Результат приповерхностного окисления водорода – андезит-базальтовые лавы возникают вследствие глубинного окисления водорода.

- Газонасыщенные вулканы с преобладанием риолит-дацитовых лав могут использоваться для добычи водорода.

Зона спрединга

Многочисленные фактические примеры собраны при обследовании различных участков зон спрединга дна Мирового океана – системы разломов, по которым происходит раздвигание океанической земной коры и наращивание ее новых сегментов. Эта зона является глубинной, по которой

происходит наиболее интенсивная разгрузка газонефтерудных рассолов при температурах 90–700°C и выше, являющихся восходящими преобразованными флюидами, зарождающимися глубоко в недрах Земли. Для иллюстрации интенсивности этого процесса отметим, что из зоны спрединга вдоль Восточно-Тихоокеанского поднятия в год выносится в океан более миллиарда кубических метров ($1,3 \cdot 10^9$) молекулярного водорода (что свидетельствует об огромной сохранившейся восстановительной мощности глубинного флюида), $0,2 \cdot 10^9$ м³ метана, глубинный He³. Эта глобальная система разломных зон имеет общую длину около 55 тыс. км. По всей ее длине происходил и происходит выход магматического вещества мантии через вулканы разного типа в виде базальтов и других преимущественно основных пород. Едва ли не через каждый десяток километров [13] наблюдаются газирующие выходы гидротермальных насыщенных флюидов со скоростью выхода газо-рассольной смеси от 0,1 до 2 м/с [29, 33, 37].

В виде примера выделим весьма впечатляющие результаты детальных исследований зоны спрединга в Калифорнийском заливе [13]. Здесь выявлено более 130 донных бугров – продуктов гидротермальной восходящей разгрузки глубинных флюидов. Они сложены кристаллическими сульфидами полиметаллов, пропитанных нефтью. Их размеры – 5–25 м высоты и 10–50 м ширины. Кроме того, выявлено около сотни действующих "курильщиков", разгружающих газо-, нефте-, металлосодержащие рассолы со скоростью до 2 м/с и находящихся в основном на сводах упомянутых бугров. Все это свидетельствует о глубинной, дегазационной природе углеводородов и ряда рудных полезных ископаемых.

Весьма важно, что в полученных образцах нефти выявлены весьма разнообразные ее летучие компоненты, а также различные полиядерные ароматические углеводороды, свидетельствующие об их высокотемпературном генезисе. Установлено также, что в гидротермальных рассолах концентрация обнаруженного He³ на 70% выше, чем в атмосфере. Все это убедительно указывает на глубинный генезис этого комплекса веществ.

Существуют гипотезы [9, 20] об активном внедрении океанических вод в нарождающуюся океаническую земную кору и их активном участии в гидротермальном изменении вмещающих пород с последующей разгрузкой через систему "курильщиков" и различных ключей. Кроме приведенных выше данных о мантийном генезисе флюидов, есть и не менее убедительные результаты, ставящие под сомнение эту гипотезу. Установлено [31], что изотопный состав воды, разгружающейся из Срединноатлантического хребта, существенно отличается от океанической воды. В ней, как и в воде метеоритов, в два раза меньше дейтерия, чем в морской воде. Следовательно, через "курильщики" разгружается глубинная ювенильная вода, а не морская.

Наблюдения, выполненные в Калифорнийской зоне в течение ряда лет, показали устойчивость упомянутой разгрузки по местоположению, скорости и составу выносимых веществ. Диапазон зафиксированных температур свидетельствует о вариациях перехода восходящего флюида из газового состояния в газожидкое, что подтверждается анализом многочисленных проб, отобранных из гидротермальных источников.

Вместе с многочисленными вулканами, нанизанными на этот своеобразный планетарный шрам, мы имеем дело с величайшей по протяженности и активности системой, определяющей глобальные наиболее интенсивные проявления планетной дегазации, в которой прослеживается целый комплекс процессов, имеющих важное научное и прикладное значение. Именно здесь наиболее четко выявляется глубинность важнейших глобальных вертикальных процессов флюидо- и теплообмена различных геосфер Земли, их масштабы и устойчивость, их цикличность и интенсивность. Анализ продуктов флюидовыделения на разных участках зоны спрединга свидетельствует о единых геохимических и термодинамических предпосылках формирования гидротермальной рудной минерализации и нефтегазопоявлений, что позволяет по-новому посмотреть на проблему формирования полезных ископаемых.

Хотелось бы еще раз обратить внимание читателя на тот факт, что и спокойные запа-

дины на равнинах платформ и бурлящие вулканы – звенья одной цепи, обуславливающие разнообразный по интенсивности и формам проявления, но единый в своей сущности процесс дегазации Земли, предсказанный В. И. Вернадским.

Выводы

1. Вертикальные линейные, трубообразные, кольцевые структуры являются важнейшими путями дегазации планеты.

2. С некоторой долей условности можно выделить ветви холодной и горячей дегазации Земли. Проявления холодной дегазации встречаются в мелких поверхностных структурах – западинах континентальных и морских, их кольцевых группах, линейных геодинамических зонах, нередко связанных с растяжениями, разломами, протяженными субвертикальными каналами дегазации – газовыми трубами. К проявлениям горячей дегазации относятся магмагенные вулканы и связанные с ними очаги постмагматической активности. Особенно велики масштабы такой дегазации в зонах спрединга.

3. По-видимому, на значительных территориях океанического дна, отличающегося небольшой мощностью подстилающей земной коры, мелкие формы в виде донных западин, линейных и других форм еще более распространены и активны, чем в пределах материков и их склонов. Вместе с материковыми формами дегазации они определяют основной баланс холодной дегазации.

4. Обнаружение массовой дегазации через континентальные и донные морские западины, линейные и другие формы в пределах материков, материковых склонов и обширных территорий океанического дна свидетельствует о существовании единой огромной разветвленной сети многомиллионных подзападных и линейных каналов, обеспечивающих гораздо большие объемы дегазации, чем считалось в соответствии с оценками, выполненными ранее.

5. Вероятно, активность дегазации из зон холодной дегазации подчинена циклам разного порядка. В периоды интенсификации концентрации газа происходит увеличение подъемной силы газовой смеси, что, возможно, приводит ее к эффекту "эр-

лифта". В верхней части пути газ освобождается из водного окружения и под избыточным давлением выходит на поверхность. Поднятый на большую высоту водный раствор имеет аномальные гидрохимические показатели по сравнению с фоновыми значениями этажно залегающих водоносных горизонтов. Приведение системы к фоновой возможно в периоды спада активности дегазации до значений, близких к нулевым.

6. В периоды спада активности дегазации должно происходить увеличение вертикального нисходящего перетока подземных вод по упомянутым раскрытым путям дегазации и переноса растворенных в них веществ. Нисходящая ветвь аномального водообмена по путям дегазации усиливает проникновение инфильтрационных вод на большие глубины, способствует увеличению ресурсов подземных вод, но при этом облегчает их загрязнение с поверхности. Восходящая ветвь способствует образованию в этажной системе водоносных горизонтов газогидрохимических и газогидродинамических аномалий.

7. Региональные газогидродинамические представления пополняются новыми знаниями о путях и закономерностях вертикальной взаимосвязи флюидных систем и, в частности, этажно расположенных водоносных горизонтов.

8. Последние оценки наличия воды в мантии, основанные на новейших результатах исследований, показывают, что ее содержание может достигать объема 10–30 наземных океанов. Следовательно, большая часть летучих, включая воду, все еще находится в глубоких недрах.

9. Значительная часть холодной дегазации в море и частично на суше (приполярные области) при соответствующем температурном режиме окружающей среды проходит через стадию формирования газогидратов.

10. С одной стороны, газогидраты и подгазогидратный газ – это перспективный для освоения энергетический ресурс. С другой – газогидраты являются источником колоссального экологического риска, обусловленного их влиянием на изменение климата планеты. Последние исследования неглубоких полярных морей свидетельствуют о критическом повышении температуры дна, на-

чале разложения газогидратов и выделения метана в воду, а затем в атмосферу. Могут развиваться различные сценарии деградации газогидратного слоя, в том числе и катастрофические для современной экосистемы планеты.

11. Из трех типов вулканов по газонасыщенности лишь гавайский тип базальтовых извержений является слабогазирующим. Газы, исходящие из жерл вулканов в атмосферу, – это в основной своей массе вторичные окисленные. Сейсмические наблюдения и отдельные комплексные данные свидетельствуют о том, что сверхсжатый водородный и углеводородный газ, прорывающийся с периодическими взрывами и землетрясениями по вертикальным газопроводящим каналам, является важным фактором все новых и новых извержений.

12. Каждый из уровней проявлений поверхностной дегазации создает определенные экологические риски. Самые крупные из них, безусловно, связаны с супервулканами (Йеллоустонский парк, Тоба). Катастрофы, связанные с извержениями этих вулканов, могут разрушить человеческую цивилизацию.

13. Обнаружение у западин и вулканов определенного типа подводных газопроводящих каналов, в которых постепенно накапливаются до значительных концентраций горючие газы (прежде всего водород), создает предпосылки для налаживания его добычи в наиболее газообильных западинах (идея В. Н. Ларина с коллегами) и в газобогащенных вулканах (предложение группы С. В. Белова). **По нашему мнению, последнее предложение следует рассматривать не только с позиций получения нового энергетического источника, но и прежде всего в качестве способа борьбы с назревающей катастрофой – взрывом супервулкана в Йеллоустонском национальном парке. Разумеется, опробование такой технологии должно осуществляться на гораздо менее опасных объектах.**

14. Исследования, выполняемые на различных участках зоны спрединга, свидетельствуют о колоссальных масштабах горячей дегазации, обуславливающей текущее формирование гидротермальной рудной минерализации и нефтегазовыделений как единого термодинамического процесса.

15. Масштабы этого процесса столь велики, что некоторые компании Канады, Японии, России и других стран уже проявили интерес к получению участков для подводной разведки и добычи полезных ископаемых на подводных срединноокеанических хребтах. В будущем это может стать весьма тривиальной и выгодной практикой. **По-видимому, и Украине следует проявить активную заинтересованность в этом вопросе.**

Список литературы

1. Анфилатова Э. А. Аналитический обзор современных зарубежных данных по проблеме распространения газогидратов в акваториях мира // Нефтегазовая геология. – 2008. – № 3. – http://www.ngtp.ru/rub/9/44_2008.pdf.
2. Багдасарова М. В. Гидротермальные системы земной коры и мантии – результат дегазации Земли // Всерос. конф. "Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы", 22–25 апр. 2008 г. – http://www.ipng.ru/files/_28448960-5e7c-4fed-bfa8-4a4fac5bb725-Bagdasarova_22_04_2008.pdf.
3. Вернадский В. И. Избранные сочинения. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. 2. – С. 388–482.
4. Вернадский В. И. Избранные сочинения. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. 4. Кн. 2. – С. 13–14.
5. Вернадский В. И. О газовом обмене земной коры // Изв. Император. Акад. наук. – 1912. – Т. 141. – С. 71.
6. Войтов Г. И. Химизм и масштабы современного потока природных газов в различных геоструктурных зонах // Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. – 1986. – Т. 31, вып. 5. – С. 533–540.
7. Галимов Э. М. О возникновении и эволюции океана по данным об изменениях $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ осадочной оболочки Земли в ходе геологического времени // Докл. АН СССР. – 1988. – Т. 299, № 4. – С. 977–981.
8. Геворкьян В. Х. Литологические аспекты учения В.И. Вернадского о биосфере // Геология и полез. ископаемые Мирового океана. – 2010. – № 3. – С. 37–56.
9. Дмитриевский А. Н., Каракин А. В., Баланюк И. Е., Матвеев В. В. Гидротермальный механизм образования углеводородов в срединно-океанических хребтах (на примере Баренцева и Норвежского морей) // Геология нефти и газа. – 1997. – № 8. – С. 4–16.
10. Дядин Ю. А., Гуцин А.Л. Газовые гидраты // Соросовский Образовательный Журнал. – 1998. – № 3. – С. 55–64.
11. Егоров В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б. Метановые сипы в Черном море: средообразующая и экологическая роль. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – 365 с.
12. Зверев В. П. Особенности и последствия геологического круговорота подземных вод // Докл. РАН. – 2009. – Т. 425, № 4. – С. 509–512.
13. Краюшкин В. А. Небиогенная нефтегазоносность современных центров спрединга дна Мирового океана // Геология и полез. ископаемые Мирового океана. – 2008. – № 3. – С. 19–39.
14. Кропоткин П. Н. Дегазация Земли и генезис углеводородов // Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д. И. Менделеева. – 1986. – Т. 31, вып. 5. – С. 540–547.
15. Ларин В. Н., Ларин Н. В. Водородная дегазация на Русской платформе, ее плюсы и минусы. – <http://hydrogen-future.com/page-id-18.html>.
16. Ларин Н. В., Ларин В. Н., Горбатилов А. В. Кольцевые структуры, обусловленные глубинными потоками водорода // Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посвященной 100-летию со дня рождения акад. П. Н. Кропоткина, 18–22 окт. 2010 г. – М.: ГЕОС, 2010. – 712 с. – http://www.ipng.ru/uf/Degazation_tesis_2010_1.pdf.
17. Логвина Е. А., Матвеева Т. В., Гладыш В. А., Крылов А. А. Комплексные исследования полярных на Чукотском плато // Пробл. Арктики и Антарктики. – 2011. – № 2 (88). – С. 45–54.
18. Лукин А. Е., Шумлянский В. А., Дьяченко Г. И., Ивантишина О. М. Проблемы холодной дегазации Земли. – Киев: Изд. ИФИ Укр. науч. асоц., 1994. – 80 с.
19. Ритман А. Вулканы и их деятельность. – М.: Мир, 1964. – 437 с.
20. Сорохтин О. Г. Жизнь Земли. – М.; Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", Институт компьютерных исследований, 2007. – 452 с.
21. Суханова Н. И. Изучение разрушающего влияния потоков водорода из недр Земли на почвенный покров, на гумусное состояние почв и, как следствие, на плодородие пахотных угодий. – <http://hydrogen-future.com/2010-11-14-13-57-59.html>.

22. *Учитель И. Л., Ярошенко В. Н., Гладких И. И., Капочкин Б. Б.* Основы неогеодинамики. Сети газопроводов как элемент деформационного мониторинга. – Одесса: Астропринт, 2000. – 144 с.
23. *Шестопапов В. М., Богуславский А. С., Бублясь В. Н.* Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. – Киев: НИЦ РПИ НАН Украины, 2007. – 118 с.
24. *Шестопапов В. М., Лялько В. И., Ситников А. Б. и др.* Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Ч.1 / В. М. Шестопапов (гл. ред.). – Киев, Ин-т геол. наук НАН Украины; Науч. инж. центр гидрогеоэкол. полиг. исслед. НАН Украины, 2001. – 636 с.
25. *Brothers L. L., Kelley J. T., Belknap D. F. et al.* Shallow stratigraphic control on pockmark distribution in north temperate estuaries // *Marine Geology*. – 2012. – Vol. 329–331. – P. 34–45.
26. *Cathles L. M., Sub Zheng, Chen Duofu.* The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration // *Marine and Petroleum Geology*. – 2010. – Vol. 27, Issue 1. – P. 82–91.
27. *Jane G., Maestro A., Ercilla G. et al.* Occurrence of pockmarks on the Ortegalete Spur continental margin, Northwestern Iberian Peninsula // *Ibid.* – Issue 7. – P. 1551–1564.
28. *Moss I. L., Cartwright J., Moore B.* Evidence for fluid migration following pockmark formation: Examples from the Nile Deep Sea Fan // *Marine Geology*. – 2012. – Vol. 303–306. – P. 1–13.
29. *Peter J. M., Scott S. D.* Mineralogy, composition, and fluid-inclusion microthermometry of seafloor hydrothermal deposits in the Southern Trough of Guaymas Basin, Gulf of California // *Canad. Mineralogist*. – 1988. – Vol. 26, Pt. 3. – P. 567–587.
30. *Pilchen R., Argent J.* Mega-pockmarks and li-
near pockmark trains on the West African continental margin // *Marine Geology*. – 2007. – Vol. 244, Issues 1–4. – P. 15–32.
31. *Piream F., Shilobreeva S., Hekinian R. et al.* Deep-sea explosive activity on the Mid-Atlantic Ridge near 34° 50' N, a stable isotope (C, H, O) study // *Chemical Geology*. – 2004. – Vol. 211. – P. 159–175.
32. *Plaza-Faverola A., Bunz S., Mienert J.* Repeated fluid expulsion through sub-seabed chimneys offshore Norway in response to glacial cycles // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2011. – Vol. 305, Issues 3–4. – P. 297–308.
33. *Rona P. A.* Hydrothermal mineralization at oceanic ridges // *Canad. Mineralogist*. – 1988. – Vol. 26, Pt. 3. – P. 431–465.
34. *Smyth J.* A crystallographic model for hydrous wadsleyite (β - Mg_2SiO_4): An ocean in the earth's interior? // *Amer. Mineral*. – 1994. – Vol. 79. – P. 1021–1024.
35. *Sun Yunbao, Wu Shiguo, Dong Dongdong et al.* Gas hydrates associated with gas chimneys in fine-grained sediments of the northern South China Sea // *Marine Geology*. – 2012. – Vol. 311–314. – P. 32–40.
36. *Thompson A. B.* Water in the Earth's upper mantle // *Nature*. – 1992. – Vol. 358, № 6384. – P. 295–302.
37. *Thompson G., Humphris S. E., Schroeder B. et al.* Active vents and massive sulphides at 26° N (TAG) and 37° N (Snakepeat) on the Mid-Atlantic Ridge // *Canad. Mineralogist*. – 1988. – Vol. 26, Pt. 3. – P. 697–711.

¹ Ин-т геол. наук НАН Украины,
Киев

Статья поступила
18.06.13

² Науч.-инж. центр
радиогидрогеоэкол. полигон.
исслед. НАН Украины,
Киев
E-mail: VSH@hydrosafe.kiev.ua