

**Вопросы безопасности***Правильная ссылка на статью:*

Дегтерев А.Х. — Оценка риска дегазации Черного моря типа лимнологической катастрофы на озере Ньос // Вопросы безопасности. – 2023. – № 4. – С. 69 - 77. DOI: 10.25136/2409-7543.2023.4.69339 EDN: GVCACD URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=69339](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=69339)

## **Оценка риска дегазации Черного моря типа лимнологической катастрофы на озере Ньос**

**Дегтерев Андрей Харитонович**

доктор физико-математических наук, кандидат географических наук

профессор, кафедра радиоэкологии и экологической безопасности, Институт ядерной энергии и промышленности, Севастопольский государственный университет

299033, Россия, Севастополь, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7

✉ degseb@yandex.ru

[Статья из рубрики "Научно-техническое обеспечение национальной безопасности"](#)**DOI:**

10.25136/2409-7543.2023.4.69339

**EDN:**

GVCACD

**Дата направления статьи в редакцию:**

12-12-2023

**Дата публикации:**

19-12-2023

**Аннотация:** Рассмотрена возможность повторения лимнологической катастрофы в условиях Черного моря. Показано, что в отличие от вулканических озер Африки Ньос и Манун, где произошли лимнологические катаклизмы в 1980-е годы, концентрация растворенных газов в глубинных водах существенно меньше насыщающей даже при атмосферном давлении. Это исключает механизм «извержения» углекислого газа типа газлифта. Однако, в меньших масштабах возможен значительный выброс метана при сильном извержении подводных грязевых вулканов. Механизм выброса углекислого газа из озера в атмосферу настолько аналогичен вулканическому извержению, что для его описания используются математические модели, разработанные для обычных вулканов. В обоих случаях подъем извергаемых масс происходит за счет увеличения плавучести газо-жидкостной смеси, которая увлекает с собой частицы окружающей

среды. Образование и увеличение газовых пузырьков на промежуточных глубинах происходит при условии, что суммарное парциальное давление всех газов внутри пузырька превышает гидростатическое давление на заданной глубине. В статье проводится расчет данных параметров. В статье показано, что концентрация растворенного метана в Черном море гораздо меньше насыщающей. В связи с относительно низкой растворимостью метана в воде, пузырьки метана способны преодолевать значительный интервал глубин. А уже как дополнительные компоненты газовой смеси вместе с метаном таким образом могут попадать в атмосферу углекислый газ и сероводород. Сделан вывод о том, что по мере повышения температуры воды в Черном море в связи с изменением климата начнут разлагаться запасы газогидратов метана на дне моря, что тоже будет сопровождаться струйным газовыделением, в том числе и через грязевые вулканы. При этом выход метана на поверхность возможен с глубин не более 900 м.

#### **Ключевые слова:**

лимнологическая катастрофа, озеро Ньос, Черное море, растворенные газы, отравление углекислым газом, газовые пузырьки, грязевые вулканы, глубинные воды, прогнозирование катастроф, стихийные бедствия

#### **Введение**

После двух известных катастроф, связанных с выбросом растворенного углекислого газа вулканическими озерами в Африке в середине 1980-х годов, проблема потенциальной опасности меромиктических водоемов является весьма актуальной. Одна из них произошла ночью 21 августа 1986 г., когда произошел выброс примерно 1 км<sup>3</sup> углекислого газа из озера Ньос в виде фонтана газо-водяной смеси высотой 100 м, в результате чего в течение нескольких часов от отравления CO<sub>2</sub> погибло 1746 человек и 3500 голов скота в радиусе 30 км от озера [4, 5, 14]. В этом случае источником повышенного содержания CO<sub>2</sub> в воде было просачивание вулканических газов через дно в течение многих лет.

Самым большим водоемом с затрудненным вертикальным обменом является Черное море, причем его глубина равна 2000 м, что на порядок больше, чем у озера Ньос. Растворимость углекислого газа пропорциональна глубине водоемов, что обеспечивает накопление большого количества растворенной углекислоты именно в глубинных водах. Важно и то, что растворимость углекислого газа сильно зависит от температуры воды (табл. 1). С учетом того, что в глубинных водах Черного моря она равна 9°C, а в озере Ньос 25°C, в 1 л воды в случае Черного моря может содержаться в виде растворенного газа на 72% больше CO<sub>2</sub> при том же парциальном давлении. С другой стороны, в морской воде растворимость газов немного меньше, чем в пресной.

Другим условием возможного «лимнологического извержения» водоемом углекислого газа является наличие выходов этого газа на дне водоема. Для Черного моря это соблюдается, известны многочисленные «сипы» [1, 3, 7] в виде поднимающихся кверху пузырьковых «облаков», называемых также «факелами». Кроме того, хорошо изучены грязевые вулканы на дне Черного моря, действие которых связано со значительными выбросами газов. Хорошо известно и о высоком содержании углекислого газа в грунтовых водах на побережье.

Механизм попадания их в атмосферу, как и в случае с африканскими озерами, вполне может быть связан с образованием плюмов пузырьков на промежуточных глубинах [13]. Это подтверждается массовым выходом метана во время Крымского землетрясения 1927 г., когда наблюдалось «горение моря» с образованием отдельных столбов и целых полос вспышек вблизи берегов Крыма [7]. Таким образом, анализ «извержения углекислого газа» озерами Ньюс и Манун с учетом последующего их мониторинга и результатами принятых мер по дегазации глубинных вод представляет несомненный интерес применительно к Черному морю.

### **Растворение CO<sub>2</sub> в воде**

Как известно, наибольшей растворимостью в воде среди всех газов обладают сероводород и углекислый газ (табл. 1) [6]. И хотя у сероводорода растворимость вдвое больше, его содержание в вулканических газах на порядок меньше. Во всяком случае концентрация обоих этих растворенных газов в глубинных водах Черного моря порядка 10 мг/л, причем у CO<sub>2</sub> она немного выше. Заметим, что эта величина не превышает 1% от растворимости этих газов даже при давлении 1 атм. Это, в частности, означает, что образование пузырьков из этих газов вследствие дегазации черноморских вод невозможно даже в поверхностных водах.

Дело еще в том, что сероводород еще гораздо более токсичен (для содержания в питьевой воде его ПДК = 0,03 мг/л), что обусловило многочисленные спекуляции на тему об опасности выхода сероводорода на поверхность. На самом деле, более высокая растворимость газа в воде ведет к его большему растворению при всплытии пузырька с многокомпонентной газовой смесью, в результате чего при выходе на поверхность его относительное содержание в смеси очень значительно уменьшается [3].

Таблица 1

Растворимость газов в воде (г/л) при их давлении 1 атм.

Температура, °C	Кислород	Углекислый газ	Сероводород	Метан
10	0,054	2,32	5,11	0,030
20	0,043	1,69	3,93	0,024
30	0,036	1,25	3,00	0,020

Опасность выхода углекислого газа до сих пор недооценивалась также потому, что на сам растворенный углекислый газ приходится лишь несколько процентов от растворенной в воде углекислоты. Дело в том, что процесс связывания углекислого газа с водой включает в себя образование так называемой карбонатной системы, куда кроме самого газа в растворе входит еще образование бикарбонат-ионов, карбонат-ионов и молекул угольной кислоты. Именно на эти ионы приходится большая часть концентрации суммарного растворенного неорганического углерода [6], которая даже в поверхностных морских водах порядка 2 ммоль/л. А это соответствует 90 мг/л в пересчете на углекислый газ. В то же время концентрация самого растворенного углекислого газа при этом порядка 0,1 ммоль/л, то есть 4 мг/л.

### **Опасные концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере**

Анатомическое исследование погибших при катастрофе у озера Ньюс в августе 1986 г.

выявило наличие углекислого газа в их легких, что и явилось основанием для заключения о их гибели от отравления углекислым газом. Хотя ряд выживших тогда свидетелей и упоминали о запахе сероводорода в ту ночь, что говорит о его наличии в газовой смеси в следовом содержании.

Анализ растворенных газов в глубинных водах вулканических озер Камеруна и Руанды показал, что в них заметна также концентрация метана [12]. В озере Ньос его молярное содержание достигает лишь 0,2 ммоль/л, а в озере Киву оно выше 20 ммоль/л (табл. 2). Но метан легче воздуха, в отличие от углекислого газа, что не позволяет ему накапливаться в понижениях рельефа в большом количестве. Близость суммарного давления растворенных газов к уровню насыщения на указанных глубинах свидетельствует о высокой вероятности дегазации озер.

Таблица 2

Содержание растворенных газов в глубинных водах озер Африки (ммоль/кг) [12]

Озеро	Глубина, м	Углекислый газ	Метан	Азот	Уровень насыщения, %
Ньос	171	132	0,272	0,166	24
Манун	69	128	1,65	0,140	67
Киву	400	58	22	0,340	45

Концентрация CO<sub>2</sub> в воздухе менее 0,5% считается неопасной, если в такой атмосфере находится не более 8 часов в сутки. При его концентрации 5% уже затрудняется дыхание, появляется головная боль, учащается пульс, проявляется легкий наркотический эффект. При ней можно находиться всего несколько минут. Если же находится в атмосфере с концентрацией CO<sub>2</sub> в 10%, то уже через 10-15 минут наступает потеря сознания. А уже при концентрации выше 15% наступает быстрый летальный исход, которому предшествует впадение в кому и конвульсии. Для оценки вероятности смерти от отравления углекислым газом предложена эмпирическая функция P(C, t), где C – концентрация CO<sub>2</sub> в процентах и t – время в минутах:

$$P = 0,5[1 + \operatorname{erf}(C - \mu)/\sqrt{2} \sigma].$$

Здесь  $\mu = 5,06 + 17,9/(1+t0,36)$  и  $\sigma = 0,66 + 2,42/(1+t0,35)$ . Следует отметить, облако CO<sub>2</sub> в окрестности озера Ньос находилось в течение 2 – 4 часов, при этом погибли сотни людей, находившихся в долине на расстоянии 20 км от озера. Особенность отравления CO<sub>2</sub> в том и состоит, что длительное нахождение в атмосфере с концентрацией углекислого газа всего несколько процентов может приводить к летальному исходу. Есть также сведения, что уже при таких концентрациях плохо работают двигатели внутреннего сгорания, гаснет открытый огонь [14]. Естественно, что рыбы и многие другие морские организмы также гибнут при образовании над поверхностью воды облака CO<sub>2</sub>.

### Механизм извержения

На английском языке лимнологическая катастрофа пишется как Lake eruption, то есть «извержение озера». И на самом деле механизм выброса углекислого газа из озера в атмосферу был настолько аналогичен вулканическому извержению, что для его описания используются математические модели, разработанные для обычных вулканов [11]. В обоих случаях подъем извергаемых масс происходит за счет увеличения

плавучести газо-жидкостной смеси, которая увлекает с собой частицы окружающей среды. По оценкам [15] выброс CO<sub>2</sub> из озера вниз происходил в виде фонтана газо-водяной смеси высотой свыше 100 м над поверхностью озера. При этом крупные капли воды сразу падали обратно в озеро, а более мелкие уносились образовавшимся облаком углекислого газа по направлению ветра и в сторону понижения рельефа. Это подтверждается тем фактом, что уровень воды в озере сразу после катастрофы был на 1 м ниже.

Это полностью аналогично тому, как происходит обычное вулканическое извержение, только вместо капель воды так переносятся капли магмы, которые, застывая, превращаются в субстанцию, которую принято называть вулканическим пеплом. Там тоже происходит дегазация жидкой магмы. При этом поступление углекислого газа настолько значительно, что составляет в среднем по планете сотни млн. т/год. В этом смысле меромиктические водоемы играют роль очага под вулканом, где накапливаются запасы CO<sub>2</sub>, запускающего в последствии извержение озера в виде фонтана газо-жидкостной смеси над его поверхностью. А движение облака CO<sub>2</sub> по понижениям рельефа местности можно сравнить с потоком лавы.

Что касается связи лимнологической катастрофы с таянием газогидратов углекислого газа на дне водоема, то это их там нет. Гидрат CO<sub>2</sub> может образовываться только при температуре воды ниже 10°C, что исключает наличие его запасов на дне озер Камеруна и Руанды.

### **Образование плюма пузырьков в воде**

Образование и увеличение газовых пузырьков на промежуточных глубинах происходит при условии, что суммарное парциальное давление всех газов внутри пузырька превышает гидростатическое давления на заданной глубине z:

$$\sum P_i + 2\sigma/r > \rho g z, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды и σ – коэффициент поверхностного натяжения воды. С другой стороны, при этом для всех газов на поверхности пузырька устанавливается равновесие в смысле равенства парциальных давлений каждого газа в растворе и в виде свободного газа. А это означает равенство парциальных давлений растворенных газов в воде соответствующим значениям для условий насыщения с учетом парциальных давлений газов в свободной фазе. Нередко условие (1) записывают также в упрощенном виде:

$$\sum P_i > \rho g z. \quad (2)$$

Это приближение допустимо для больших глубин, когда  $\rho g z \ll \rho g z$  и не слишком мелкие пузырьки.

Для пузырьков с однокомпонентным составом, в том числе и для пузырьков углекислого газа, условие (1) сводится к равенству концентрации растворенного газа С насыщающей концентрации этого газа в воде при давлении  $P_{atm} + \rho g z$ :

$$C = C_{sat}(z). \quad (3)$$

В свою очередь, значения  $C_{sat}$  рассчитываются с использованием коэффициентов растворимости Оствальда λ для данного газа в воде. Применение закона Генри, когда молярная насыщающая концентрация рассчитывается с использованием коэффициентов Генри, вообще говоря правомерно лишь для невысоких давлений. Однако, при

температуре воды до 30°C и давлении до 200 атм зависимость молярной насыщающей концентрации растворенного в воде CO<sub>2</sub> от давления еще можно считать линейной [10]. Поэтому для всего интервала глубин Черного моря можно пользоваться данными табл. 1 для оценки С<sub>нас</sub>(z) по линейной зависимости. Соответственно, для глубины 1000 м получим растворимость порядка 200 г/л. Таким образом, в чистом виде катастрофа типа лимнологической в вулканических озерах с выбросом углекислого газа произойти в Черном море не может. Но нечто похожее может произойти на небольшой части его акватории в случае катастрофического извержения подводных вулканов, когда пузырьки свободного газа достигают поверхности воды до их полного растворения. При этом не требуется перенасыщения воды растворенными газами.

На дне Черного моря выбросы метана обычно связаны с грязевыми вулканами, значительное количество которых имеется вблизи берегов Крыма (рис. 1) и на его берегах в районе Керчи. Вообще, грязевый вулканизм характерен для Альпийско-Гималайского геосинклинального пояса. При извержении грязевых вулканов выбрасывается значительное количество газов, среди которых обычно преобладают метан и углекислый газ (рис. 2).

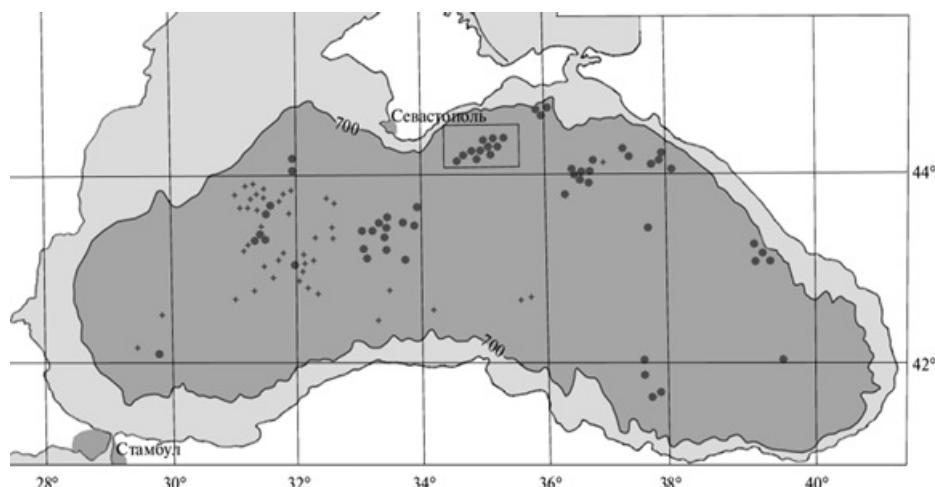


Рис. 1. Грязевые вулканы на дне Черного моря [7].

Концентрация растворенного метана в Черном море гораздо меньше насыщающей. В глубинных водах она составляет до 0,02 ммоль/л, что на порядок меньше его концентрации в озере Ньюс и на три порядка меньше, чем в озере Киву (табл. 2). Однако, в связи с относительно низкой растворимостью метана в воде (она примерно равна растворимости кислорода), пузырьки метана способны преодолевать значительный интервал глубин. А уже как дополнительные компоненты газовой смеси вместе с метаном таким образом могут попадать в атмосферу углекислый газ и сероводород. Хотя выход метана и сам по себе представляет серьезную опасность в связи с образованием взрывоопасной метановоздушной смеси.

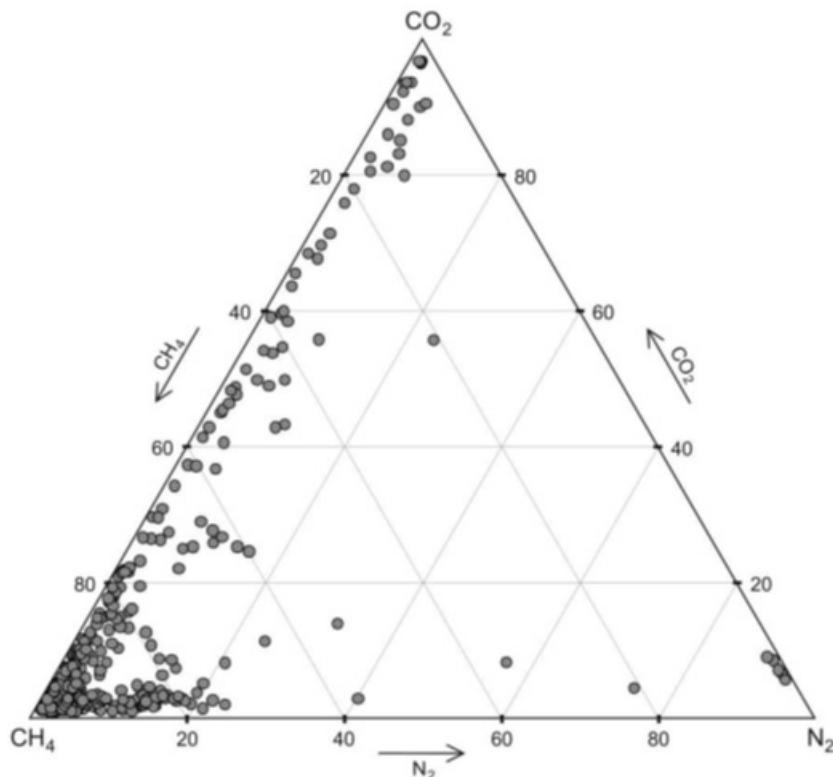


Рис. 2. Газовый состав выбросов грязевых вулканов [2].

### **Заключение**

Следует отметить, что для грязевых вулканов, как и для обычных вулканов, тоже характерна периодичность действия. Но предсказать очередной катастрофический выброс газов в этом случае сложнее, так как ему не предшествует постепенное повышение концентрации растворенных газов в глубинных водах. Можно лишь отметить, что по мере повышения температуры воды в Черном море в связи с изменением климата начнут разлагаться запасы газогидрата метана на дне моря, что тоже будет сопровождаться струйным газовыделением, в том числе и через грязевые вулканы. При этом выход метана на поверхность возможен с глубин не более 900 м [1].

### **Библиография**

1. Артемов Ю.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Поликарпов Г.Г. Новые каналы струйной разгрузки метана во впадине Сорокина в глубоководной части Черного моря // Морской экологический журнал. – 2013. – Т.12, № 4. – С. 27-36.
2. Бондаренко Д.Д., Ершов В.В. Газогеохимия грязевых вулканов в связи с прогнозом нефтегазоносности земных недр // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2019. – №2. – С. 41-46.
3. Дегтерев А.Х. Влияние гидратообразования на проявление свободных газовых выходов метана на дне водоемов // Геология и геофизика-2017, Т.58, № 9. – С. 1388-1393.
4. Краснова Е.Д. Экология меромиктических озер России. 1. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. – 2021. – Т.48, № 3. – С. 323-333.
5. Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Краснова Е.Д. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // Океанология. – 2021. – Т.61, № 3. – С. 401-412.
6. Решетняк О.С., Никаноров А.М. Гидрохимия и охрана водных ресурсов. – Ростов-на

Дону: Изд.ЮФУ, 2018. – 134 с.

7. Шнюков Е.Ф. Грязевые вулканы Черного моря как поисковый признак газогидратов метана // Литология и полезные ископаемые. – 2013. – № 2. – С. 114-121.
8. Шнюков Е.Ф., Пасынков А.А., Любицкий А.А. и др. Грязевые вулканы на прикерченском участке шельфа и материкового склона Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2010. – № 3. – С. 28-36.
9. Barrenbold F., Boehrer B., Grilli R., Mugisha A. No increasing risk of limnic eruption at lake Kivu: Intercomparison study reveals gas concentrations close to steady state // PLoS ONE. – 2020. – N 8. – P. 1-14.
10. Duan Z., Sun R. An improved model calculating CO<sub>2</sub> solubility in pure water and aqueous NaCl solutions from 273 to 533 K and from 0 to 2000 bar // Chemical Geology. – 2003. – 193. – P. 257-271.
11. Folch A., Barcons J., Kozono T., Costa A. High-resolution modelling of atmospheric dispersion of dense gas using TWODEE-2.1: application to the 1986 Lake Nyos limnic eruption // Natural Hazards and Earth system Sciences. – 2017. – Vol.17 (6). – P. 861-879.
12. Kling G.W., Evans W.C., Tuttle M.L. A comparative view of Lake Nyos and Monoun, Cameroon, West Africa // Internationale Vereinigung fur theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen. – 1991, December. – P. 1102-1105.
13. Kozono T., Kusakabe M., Yoshida Y. et al. Numerical assessment of the potential for future limnic eruptions at lakes Nyos and Monoun, Cameroon, based on regular monitoring data // Geological Society London Special Publication. – 2016, January. – P. 1-14.
14. Manirambona E., Aaebisi J.A., Lucero-Prisno III.E. Volcanic and limnic eruption: a potential threat to one health // PAMJ – One Health. – 2021. – 6(6). – P. 1-5.
15. Zhang Y. Dynamics of CO<sub>2</sub> – driven lake eruptions // Letters to Nature. – 1996. – Vol. 379. – P. 1-3.

## **Результаты процедуры рецензирования статьи**

*В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.*

*Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).*

Предмет исследования являются, по мнению автора, Оценка риска дегазации Черного моря типа лимнологической катастрофы на озере Ньосс использованием различных расчетных формул.

Методология исследования исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании методов литературного анализа, сравнительных характеристик географических объектов и процессов, картографический метод, метод построения диаграмм.

Актуальность затронутой темы после двух известных катастроф, связанных с выбросом растворенного углекислого газа вулканическими озерами в Африке в середине 1980-х годов, проблема потенциальной опасности меромиктических водоемов является весьма актуальной. Исследования автора статьи помогают понять механизм самого большого водоемома с затрудненным вертикальным обменом - это Черного моря в при изменении погодно-климатических условий.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований по мере повышения температуры воды в Черном море в связи с

изменением климата начнут разлагаться запасы газогидрата метана на дне моря, что тоже будет сопровождаться струйным газовыделением, в том числе и через грязевые вулканы, при этом выход метана на поверхность возможен с глубин не более 900 м.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс дегазификации морской воды и выделения газов из грязевых вулканов, а также выделение газа в результате динитрофикации и гниения органических остатков в условиях различных глубин Чёрного моря.

Таблицы и графики иллюстративны, хотя, на наш взгляд, следовало бы обозначить перспективы использования газогидратаметана, объемы которого оцениваются в 25 триллионов кубометров, что позволяет говорить о высокой энергетической привлекательности подобного процесса. Стоило обратить внимание и на экзогенные факторы, влияющие на процесс дегазации, применение расчетных формул в зависимости от хранилищ, степени контакта с окружающимисредоцй в системе море-атмосфера, объемами и динамикой изменения температур, теплопроводностью и теплоемкостью волды и прочее.

Автор рассмотрел дегазацию углекислого газа, метана, однако не упомянул о проблеме дегазации сероводорода. Как и остальные газы, сероводород представляет собой энергетическое сырье, в то же время может служить источником колossalных экологических последствий вплоть до катастрофы в результате перемешивания различных слоёв воды Черного моря.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволяющие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.