ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ СЕРОВОДОРОДНОЙ ЗОНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Е.Е.Совга, С.П.Любарцева
Морской гидрофизический институт НАН Украины.
г.Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

В настоящее время Черноморский регион становится одним из динамично развивающихся перспективных районов в глобальной мирохозяйственной системе, и играет значительную роль в экономике, социальной и международной политике всех черноморских стран.

Государство Украина среди всех причерноморских стран обладает самой большой протяженностью береговой зоны, которая составляет примерно 3000 км, поэтому Черное море играет огромную роль в экономике нашей страны благодаря крупному потенциалу его природных ресурсов - биологических, химических, энергетических и рекреационных.

Все чаще в последние годы на разных международных встречах активно обсуждаются вопросы и проблемы, связанные с использованием, как различных ресурсов моря (биологических, неорганических минеральных, энергетических, рекреационных) так и рассматриваются проекты прокладки по дну моря глубоководных газо-и нефтепроводов, кабелей связи и т.п.

Однако реализация любого из перечисленных проектов, разработка новых геологических источников газа и нефти на шельфе моря, использование энергетических ресурсов сероводородной зоны [1], связаны со значительным влиянием на экосистему моря в целом и требуют не только постоянного экологического мониторинга за состоянием моря в целом, но и глубоких знаний океанологических процессов, протекающих в экосистемах моря, а также основных механизмов функционирования черноморских экосистем.

Исходя из позиций рассмотрения черноморской сероводородной зоны как сложной бактериальной экосистемы, при участии автора настоящей работы совместно с акад НАН Украины В.И.Беляевым была разработана математическая модель экосистемы сероводородной зоны [2]. Назначение модели - прогнозирование возможных последствий эволюции сероводородной зоны в условиях возрастающих антропогенных нагрузок [3]. Основу модели составили геохимические процессы, связанные с круговоротом серы в море [2]. Все неорганические формы серы возникают в море как промежуточные продукты ряда последовательных химических и микробиологических процессов, обуславливающих образование и накопление сероводорода в системе, а также его убыль в результате химического и микробиологического окисления. Следует отметить, что разработка математической модели такой сложной системы какой является сероводородная зона моря - трудная математическая задача, которая решалась в несколько этапов. На первом этапе решался вопрос о взаимодействии двух компонентов сероводорода и кислорода [4]. Главное внимание было уделено подбору констант скорости реакции окисления сероводорода кислородом и соотношениям реагирующих газов, наиболее приближенным к реальным условиям. Результаты расчета констант и соотношений реагирующих газов представлены в работе [4] и были затем использованы при дальнейших разработках математической модели.

В модели экосистемы рассматривается семь компонент c_i концентраций веществ: кислорода (i = 1), сероводорода (i= 2), тиосульфатов (i=3), углерода органических веществ (i=4), сульфатредуцирующих бактерий (i=5), тионовых бактерий (i=6), молекулярной серы S°(i=7). Кроме того, примем во внимание еще четыре компоненты s_i, относящиеся к внешним факторам: концентрации нитратов NO_3^- (i=1), аммиака NH_3 (i=2), соединений марганца и сульфатов (i=4). Последние перечисленные компоненты считаются не лимитирующими процессы в экосистеме.

Ниже приведены предварительные оценки возможностей практического применения разработанной модели экосистемы сероводородной зоны для прогноза ее состояния в условиях реализации современных проектов, связанных как с использованием ее ресурсов, так и со строительством и эксплуатацией глубинных газопроводов.

Приведенная выше разработанная модель экосистемы сероводородной зоны моря, как показали некоторые численные эксперименты может быть использована как современный инструмент контроля состояния сероводородной зоны в условиях реализации технологических проектов по использованию как различных ресурсов (минеральных, энергетических) самой зоны, так и при строительстве и эксплуатации глубинных газо и нефтепроводов [1].

Численные эксперименты на модели еще до строительства такого газопровода могут дать прогнозные оценки экологической безопасности для экосистемы его эксплуатации и определить уровень риска экосистемы в случае возможных аварийных ситуаций. В связи с возможным практическим применением модели именно в таком ракурсе, мы сочли необходимым привести в работе информацию о фоновом содержании метана в Черном море, которое расчитывается исходя из известного факта, что количество взвешенного углерода в Черном море, вовлеченного в метановый цикл составляет около 0,5% от его первичной продукции в море, его источниках и геохимическом поведении.

Метан в Черном море может иметь двойную природу: это так называемый ископаемый метан, выделяющийся из недр Земли и метан биогенного происхождения, который аналогично сероводороду, является продуктом бактериальной жизнедеятельности.

В работах посвященных изучению распределения метана в Черном море подчеркивается сходность характера вертикального профиля его с таковым для сероводорода, но в отличие от сероводорода концентрации его намного ниже(сероводород измеряется в мг на литр, а метан - микромолях на литр), Вертикальные профили для обоих газов представлены в [5] .

Если рассматривать биогенное происхождение метана, то он согласно данным [5,6] образуется в восстановительных условиях при бактериальном разложении органических веществ не содержащих азот и фосфор таких как карбогидраты и жирные кислоты. Метанобразующие микроорганизмы также как и сульфат редуценты относятся к строгим анаэробам, процесс образования метана в иловых отложениях начинается только когда окислительно-восстановительный потенциал падает ниже - 200 мВ. Если сульфат-редуцирующие бактерии наиболее широко представлены в самом поверхностном слое ила от 0 до 2 см при значении окислительно-восстановительного потенциала от - 100 до - 150 мВ, то максимальная численность метанообразующих бактерий располагается от 3 до 6 см от поверхности илов при окислительно-восстановительном потенциале от -250 до - 300 мВ. Таким

образом, основные микробиологические реакции продукции метана следующие:

CO_2 reduction $CO_2 + 8H^+ = CH_4 + 2H_2O$

Acetic acid fermentation $CH_2COOH = CH_4 + CO_2$

В работе [7] приведен общий бюджет метана в Черном море и рассмотрены вопросы его глобальной геохимии. По данным [7] количество углерода задействованного в метановом цикле составляет 0,5% от всей первичной продукции. Продукция метана в осадках шельфа и склона (100 - 1 500 м) составляет 2,9 x 10^{11} молей CH_4 в год. Такой же цифрой оценивается потери метана в результате окисления его в столбе воды ниже 100 м. По оценкам [7] в атмосферу эвазия составляет $4,1x10^9$ молей CH_4 в год. Отток через Босфор составляет $1,9x10^6$ молей CH_4 в год. Исследования авторов [7] показали, осадки шельфа/склона могут быть источниками метана, а глубинные осадки способны потреблять метан из столба воды аналогично сероводороду по данным [8]. По-видимому, подобная ситуация связана с расположением на шельфе и по периферии моря источников первичной продукции.

Очевидно, что именно в этих районах находятся также и источники эндогенного ископаемого метана. На рис. 1 представлена схема расположения районов газовыделений метана в Черном море и представленная в работе [9].

Впервые газовыделения метана из дна Черного моря были обнаружены в 1989 году сотрудниками ИнБЮМ НАН Украины [10]. Детальные биогеохимические исследования были выполнены на двух станциях северозападной части Черного моря в 1990 году на глубинах 226-230 м и 176-180 м. Содержание метана в газовыделениях составило от 80 до 96% с изотопным составом C^{13} = 58,2% [9]. Очаги выходов газа были покрыты буроватыми пятнами колоний бактерий и карбонатными постройками высотой от 30 до 100 см. Установлено, что эти микроорганизмы являются метанотрофами-метанокисляющими бактериями. Как известно метан в отсутствии кислорода (в сероводородной зоне) биологически инертен, но в присутствии кислорода он может окисляться до клеточного уровня, переходя в биомассу бактерий и до углекислоты. Таким образом метан служит потенциальным источником как первичной, так и вторичной продукции органического вещества. В работе [10] просчитаны дополнительные количества органического вещества, которые могут образовываться за счет работы метан окисляющих микроорганизмов. Это органическое вещество может служит дополнительным источником углерода и энергии для процесса сульфатредукции в Черном море. В местах струйных газовыделений метана на северо-западном шельфе его пузырьки доходили до поверхности моря и поступали в атмосферу. Природа газовых факелов изучалась и в 1998 году ее результаты представлены в работе [11].

Для приведенного выше практического использования разработанной модели необходимо будет провести некоторую ее модификацию путем введения в модель дополнительных новых компонентов, а именно:

- поток метана со дна моря ;
- скорость его окисления микробиологическим путем и атмосферным кислородом;
- численность и скорость размножения метанокисляющих микроорганизмов.

Возможные аварийные ситуации на газопроводе дадут дополнительные количества метана в экосистему сероводородной зоны моря. Поэтому численные эксперименты на модели экосистемы сероводородной зоны должны быть проведены по двум вариантам.

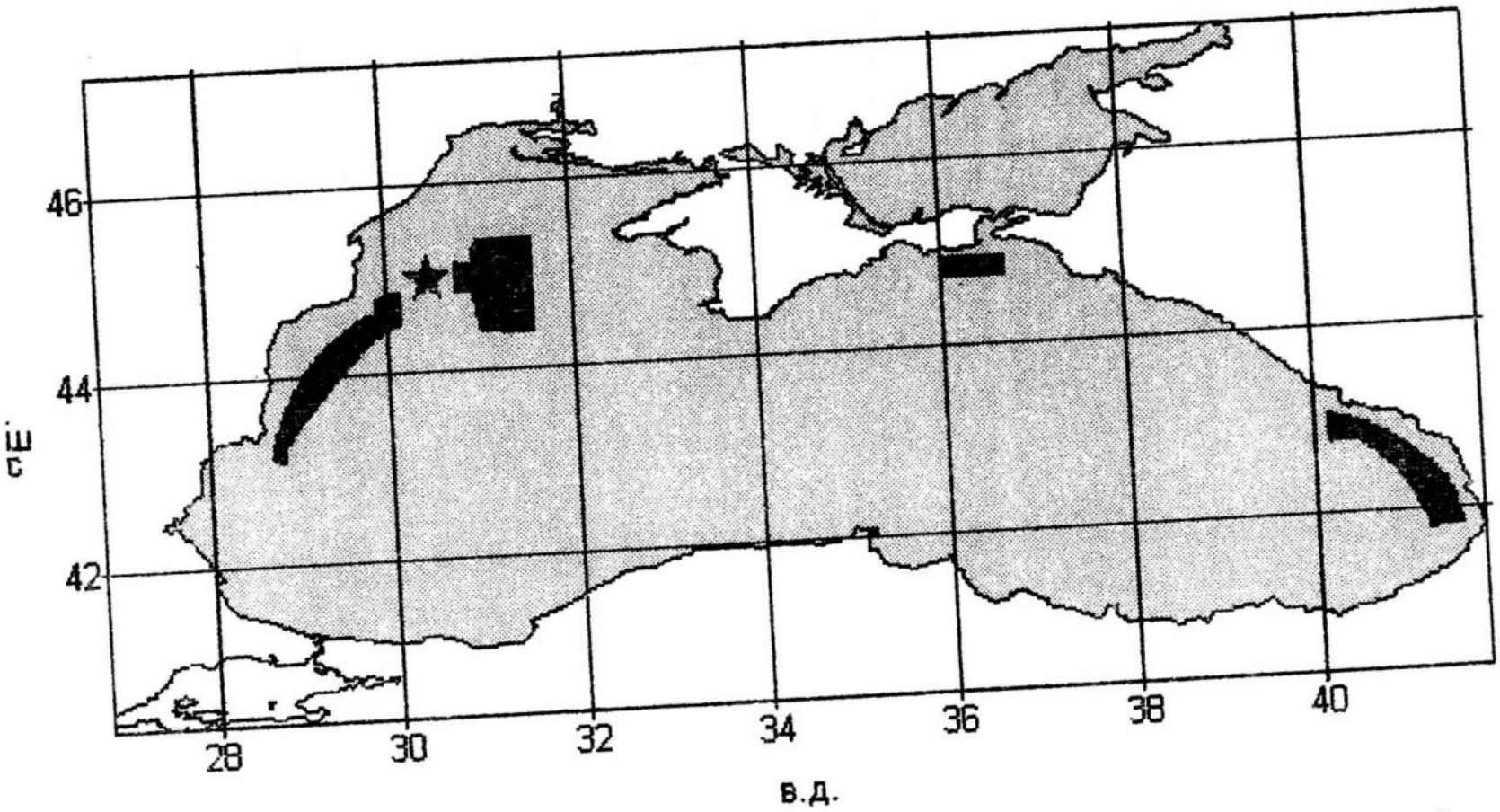

Рис. 1. Расположение обнаруженных районов газовыделения метана (фиолетовый цвет) в Черном море.
Звездочкой отмечен район работ "Бентос" в декабре 1990

Первый вариант: метан потребляется сульфатредуцирующими бактериями либо согласно данным [12] консорциумом микроорганизмов (метаногены и сульфатредуценты) в соответствии с реакцией:

$CH_4 + SO_4^{2-}$ --------- $HS^- + HCO_3^- + H_2O$

Расчеты, проведенные по первому варианту позволят оценить, насколько аварийные выходы метана и их обьемы повлекут за собой трансформацию сероводородной зоны, а именно: увеличение сероводородной зоны, изменение положения ее верхней границы, возможные сдвиги в равновесиях карбонатной системы.

Второй вариант - метан не потребляется сульфатредуцирующими бактериями, а описанный в работе [12] консорциум микроорганизмов в Черном море не обнаружен. В этом случае убыль метана обеспечивается только скоростью микробиологического его окисления и скоростью эвазии в атмосферу с последующим окислением атмосферным кислородом. Расчеты по второму варианту позволят получить оценки эволюции слоя взаимодействия аэробных и анаэробных вод, где преимущественно и будут протекать микробиологические процессы окисления метана. По оценкам [12] скорость окисления метана составляет 0,15 л/ м² в сутки, за счет окисления метана может образовываться изотопно легкое органическое вещество, которое может увеличить содержание С орг в 1,5-4 раза, т.е образуется около 23% $C_{орг}$ за счет окисления метана (метанотрофный синтез ОВ). Кроме того, процесс окисления метана связан с потреблением кислорода, что также повлечет за собой изменение границ залегания сероводорода.

Таким образом, даже предварительные оценки показывают, что использование сероводородной зоны для прокладки глубинных газопроводов небезопасно для ее экосистемы. В случае потребления метана сульфатредуцентами могут образовываться дополнительные количества сероводорода, в случае же простого его микробиологического окисления, будут образовываться дополнительные количества органического вещества легкодоступного как пища сульфатредуцентов, что также скажется на обьемах образованного сероводорода. Однако следует отметить, что во втором случае опасность для экосистемы гораздо меньшая, поскольку не весь метан сможет сразу окислиться микробиологически, часть его безусловно попадет в атмосферу, причем неокисленный метан проходя толщу сероводородной зоны (практически не растворяясь в воде) будет насыщаться сероводородом, выходить в атмосферу и в зависимости от существующей над морем гидрометеоситуации вызывать неблагоприятные последствия для рекреационных зон побережья. Только расчеты на модели всех возможных вариантов реализации различных проектов использования сероводородной зоны могут быть основанием для принятия того или иного проекта.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Совга Е.Е., Беляев В.И., Еремеев В.Н. Экологические проблемы использования ресурсов глубинной сероводородной зоны. // Материалы международной конференции "Открытое общество" Всеукраинский комитет поддержки программы ООН по окружающей среде (Севастопольское отделение)- Севастополь, октябрь 1998 - С. 24-25.

2. Беляев В.И. , Совга Е.Е. Математическая модель экосистемы сероводородной зоны Черного моря

// Морской гидрофиз.журнал, -1991- № 6 - С. 42-54.

3. Belyaev V.I., Sovga E.E., Modelling the hydrogen sulphide zone of the Black Sea // Ecological modelling . - 1997, N 96 , p. 51-59.

4. Беляев В.И., Совга Е.Е., Чепкасова В.А. Оценка гидрохимической структуры сероводородной зоны Черного моря по модели ее экосистемы.. // В сб. Матер.Конф. "Совершенствование управления развитием рекреационных систем" Севастополь, 23-25 окт.1986 г. Севастополь , 1987, ч.П С. 259-268, Деп. в ВИНИТИ, 11.08.87 г. № 5804 - В 87.

5. Larry P.Atkinson, Francia A.Richards, The occurrence and Distribution of methane in the marine environment, Deep Sea Research, 1967, vol. 14, N 6, p 673-684.

6. C.S.Martans and R.A.Berner, Intertitial waters chemistry of anoxic Long Island Sound Sediments. 1. Dissolved gases. Limnol. and Oceanogr. 1977, vol.22, N 1, p 10-25.

7. Reeburch W.S., Ward B.B., Whalen S.C., Sandbech K.A. Black Sea methane geochemistry.//Deep Sea Research, 1991, V.38, Suppl. 2, P.1189–1210.

8. Безбородов А.А., Еремеев В.Н. Черное море. Зона взаимодействия аэробных и анаэробных вод. Севастополь , МГИ НАН Украины, 1993,- 298 с .

9. Иванов М.В., Поликарпов Г.Г. и др. Биогеохимия цикла углерода в районе метановых газовыделений Черного моря. ДАН СССР том 320, N 5, 1991 , с 1235-1240.

10. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Нежданов А.И. и др. Явления активного газовыделения из поднятий на свале глубин западной части Черного моря. ДАН УССР, серия Б, N12, 1989, с 13-15.

11. Природа газовых факелов на северо-западном шельфе Черного моря. В кн. Геология, геофизика и гидрография северо-запада Черного моря. Киев, ОМГОР НАН Украины 1998 , с 69-74ю Под редакцией акад. Е.Ф.Шнюкова.

12. Леин А.Ю., Пименов Н.В., Саввичев А.С. и др. Метан как источник органического вещества и углекислоты карбонатов на холодном сипе в Норвежском море. // Геохимия, № 3, 2000 , с. 268-281.