

МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ГЛУБИННОМ ГАЗОПРОВОДЕ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

E.E.Совга, С.П.Любарцева

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г.Севастополь, ул.Капитанская,2
E-mail: oaoi@alha.mhi.iuf.net

В работе представлены результаты численных экспериментов на математической модели экосистемы сероводородной зоны Черного моря по получению прогнозных оценок экологических последствий аварийных ситуаций на глубинном газопроводе при определенных объемах выбросов метана и продолжительности аварии до момента ее ликвидации.

Общие представления по оценке возможностей использования методов математического моделирования для прогноза состояния экосистемы Черного моря при реализации технических проектов представлены нами в работе [1]. В развитии положений работы [1] в настоящем сообщении приводятся результаты численных экспериментов на модели экосистемы сероводородной зоны [2] экологических последствий для экосистемы моря аварийных ситуаций на глубинном газопроводе, строительство которого предполагается в восточной части Черного моря. В расчетах учитываются определенные объемы выбросов метана и продолжительность аварии до момента ее ликвидации. Для использования математической модели экосистемы сероводородной зоны [2]

именно для приведенных выше целей была осуществлена [1] некоторая ее модификация путем введения дополнительных компонент.

Возможные аварийные ситуации на глубинном газопроводе приведут к поступлению значительных объемов метана в экосистему сероводородной зоны. Чтобы оценить влияние этих объемов на фоновое содержание метана в рамках математической модели экосистемы сероводородной зоны осуществлялось моделирование вертикального профиля метана.

В модели формализуется цикл серы в аксиально-симметричном приближении. К этому циклу добавлены уравнения, описывающие концентрацию метана и метанокисляющих бактерий. Уравнения переноса концентрации $C_i(x, y, z, t)$ примеси класса адвекция - диффузия-реакция имеют вид:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial (UC_i)}{\partial x} + \frac{\partial (vC_i)}{\partial y} + \frac{\partial ((w + w_i)C_i)}{\partial z} - \mu_z \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - \mu_1 \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} \right) = F_i,$$

где: w_i - вертикальная скорость осаждения взвешенной компоненты (углерода органических веществ, в данном случае);

μ_z и μ_1 - коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии соответственно.

F_i - функции мощности источников.

Данная иерархическая система параболических уравнений второго порядка решается относительно следующего характеристического вектора экосистемы:

Компонента характеристического вектора	Единицы измерения
C_1 Углерод взвешенных органических веществ $C_{\text{орг}}$	Мкг/л
C_2 Кислород O_2	Мкг/л
C_3 Сероводород H_2S	Мкг/л
C_4 Тиосульфаты $S_2O_3^{2-}$	Мкг/л
C_5 Молекулярная сера S^0	Нг/л
C_6 Тионовые бактерии ТВ	Нг/л
C_7 Сульфатредуцирующие бактерии SR	Нг/л
S_8 Метан CH_4	Нг/л
S_9 Метанокисляющие бактерии МОХ	Нг/л

Схема учтенных при моделировании процессов приведена на рис. 1. В связи с тем, что естественный метан образуется только в анаэробных осадках моря, а в водной толще его образование не происходит, в численных экспериментах ограничивается только потоком его со дна. В модели параметризуются следующие биогеохимические процессы:

- Фотосинтез,
- Сульфатредукция,
- Химическое окисление сероводорода,
- Биологическое окисление сероводорода,
- Биологическое окисление других восстановленных форм серы,
- Образование пирита,
- Окисление метана метанокисляющими бактериями и сульфатредукторами,
- Гравитационное оседание углерода взвешенных органических веществ,
- Динамика популяций тионовых, сульфатредуцирующих, метанокисляющих бактерий в экосистеме сероводородной зоны Черного моря.

В рамках описанной математической модели было реализовано три численных эксперимента. Первый – по расчету базового состояния экосистемы. Это – стационарное решение, характеризующее некое среднее состояние. Базовый вариант *a priori* предполагает отсутствие каких-либо эндогенных (антропогенных, в том числе) источников метана. Базовое распределение характеризует, таким образом, многогодичный природный фон компонентов экосистемы (в том числе метана) в глубоководной части Черного моря. Особенностью найденного решения является существование промежуточного слоя, в котором концентрация почти всех компонентов экосистемы или их градиенты достигают экстремальных значений – так называемого хемоклина. Вертикальный ход компонентов экосистемы в хемоклине центральной части моря приведен на рис. 2. Вертикальные профили метана и метанокисляющих бактерий на рис. 3а. Источник метана находится на дне. Он достаточно слаб, поэтому концентрация метана у дна составляет 182 нг/л. Стационарным источником обеспечивается небольшой положительный вертикальный градиент у дна. Основным транспортным механизмом в слоях глубже 200 м является турбулентная диффузия, вертикальная и горизонтальная. Затем в слое 160–120 м наблюдается резкое уменьшение концентрации метана с 160 нг/л до 40 нг/л. Вертикальный градиент в этом слое достигает своего максимального значения, равного 3 нг/(л·м). Здесь медленно диффундирующий из глубинных слоев метан окисляется бактериями, которые демонстрируют максимальную биомассу (72 нг/л). Кроме того, на глубинах примерно 50 м имеет место

мощный пикноклин, который обеспечивает значительную устойчивость слоя и препятствует его вскипявлению. Поэтому в слое 0–120 м концентрация метана мала (до 40 нг/л). Незначительны здесь и вертикальные градиенты. Заметим, что расчет показал наличие слабого потока метана из водной толщи в атмосферу (4,8; 5,2; 6,4 мгС/(м²·год)). В промежуточной зоне характер вертикального хода не меняется. Лишь характеристики точки распределения смещаются вглубь. Низкие концентрации имеют место до 75 м. Первый квазилинейный участок доходит до 155 м, второй – до 182 м, где концентрация равна 175 нг/л. Концентрация у дна в периферийной зоне 183 нг/л. На периферии первый квазилинейный участок расположен от 93 до 198 м, второй – до 270 м, концентрация метана на дне равна 184 нг/л. Таким образом, куполообразное пространственное распределение характерно и для метана.

Второй численный эксперимент предполагает наличие на дне модельного объема эндогенного источника с постоянной мощностью 5 гС/м²·год. Такой мощностью может обладать источник геологического происхождения. Решается стационарная задача. Вертикальный профиль в центре цилиндра представлен на рис. 3б. Видно, что источник такой мощности не вызывает значительного изменения ни профиля, ни соответствующих потоков. При этом заметна тенденция деформации профиля. При увеличении потока метана со дна его концентрация на всех горизонтах и концентрация метанокисляющих бактерий увеличивается. В нашем случае на горизонте 100 м с 22 до 24 нг/л, на горизонте 200 м с 181 до 188 нг/л – на горизонте 300 м с 182 до 189 нг/л. Источник метана такого рода не вызывает опущимых изменений в распределении остальных компонентов экосистемы сероводородной зоны.

Третий численный эксперимент описывает результат действия во времени кратковременного, но исключительно мощного источника – так называемый, *spin-up* расчет. Источник функционирует 4 часа, его мощность возрастает от центра цилиндра к периферии и варьирует от 13 до 236 гС/м²·год, что соответствует интегральному выбросу газа от 500 до 15800 т. Для проведения численного расчета, вертикальная дискретизация схемы у дна была увеличена. *Spin-up* задача не допускает применения быстрого алгоритма, описанного выше. Расчет производился с временным шагом, не превышающим 30 мин. Эволюция профиля метана представлена на рисунке 3в. Воздействие выброса максимально в придонном 40-метровом слое. Затем оно экспоненциально падает и выше, чем 180 м от дна практически не опускается. После прекращения действия источника «волна» возмущения очень

Цикл серы

Акцепторы
электронов

Фрагмент цикла углерода

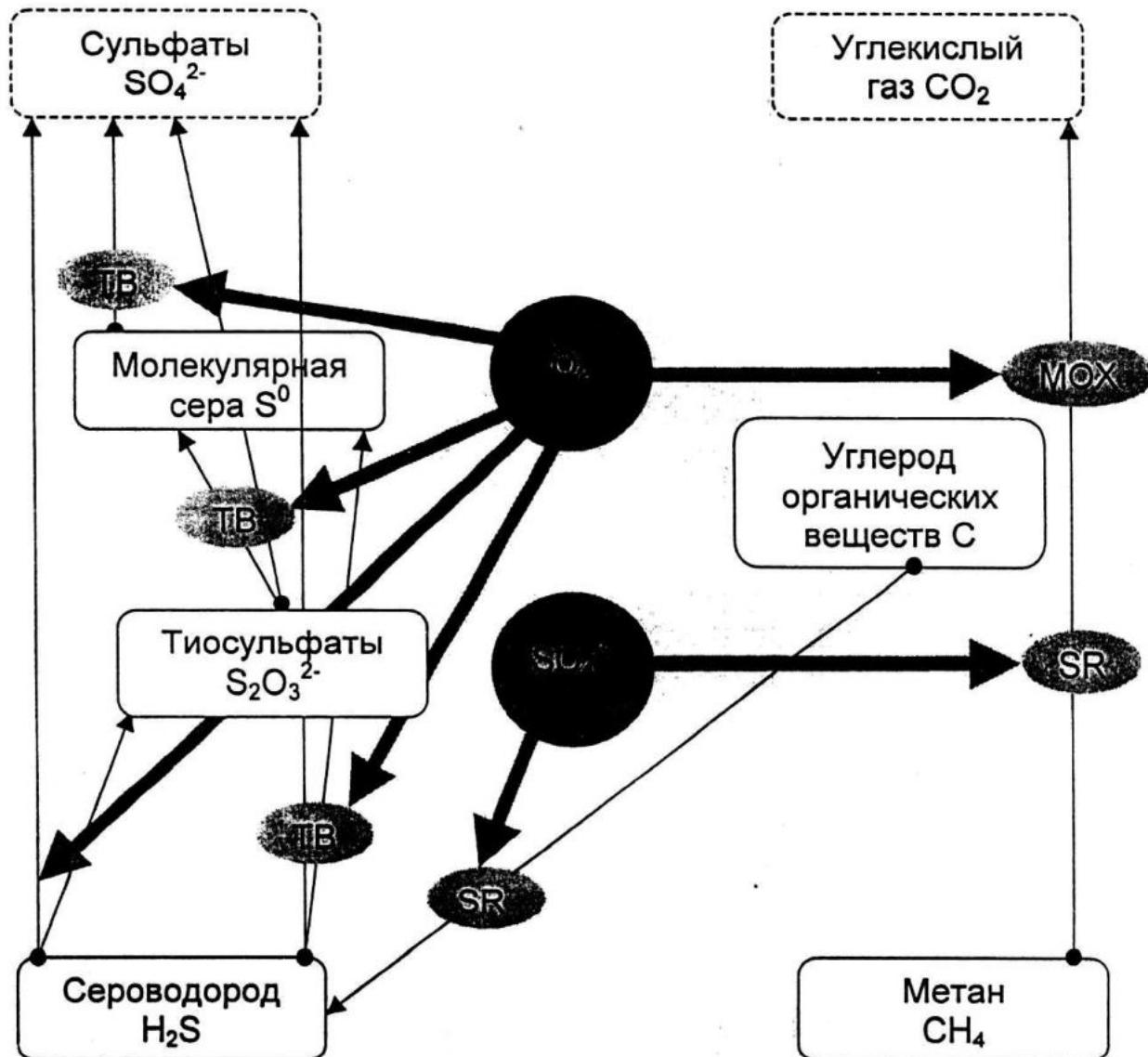


Рис. 1. Схема биогеохимических процессов, учтенных при моделировании потока метана в экосистеме сероводородной зоны Черного моря

Бактерии, осуществляющие биогеохимические реакции:

TB – тионовые,

SR – сульфатредуцирующие,

МОХ – метанокисляющие.

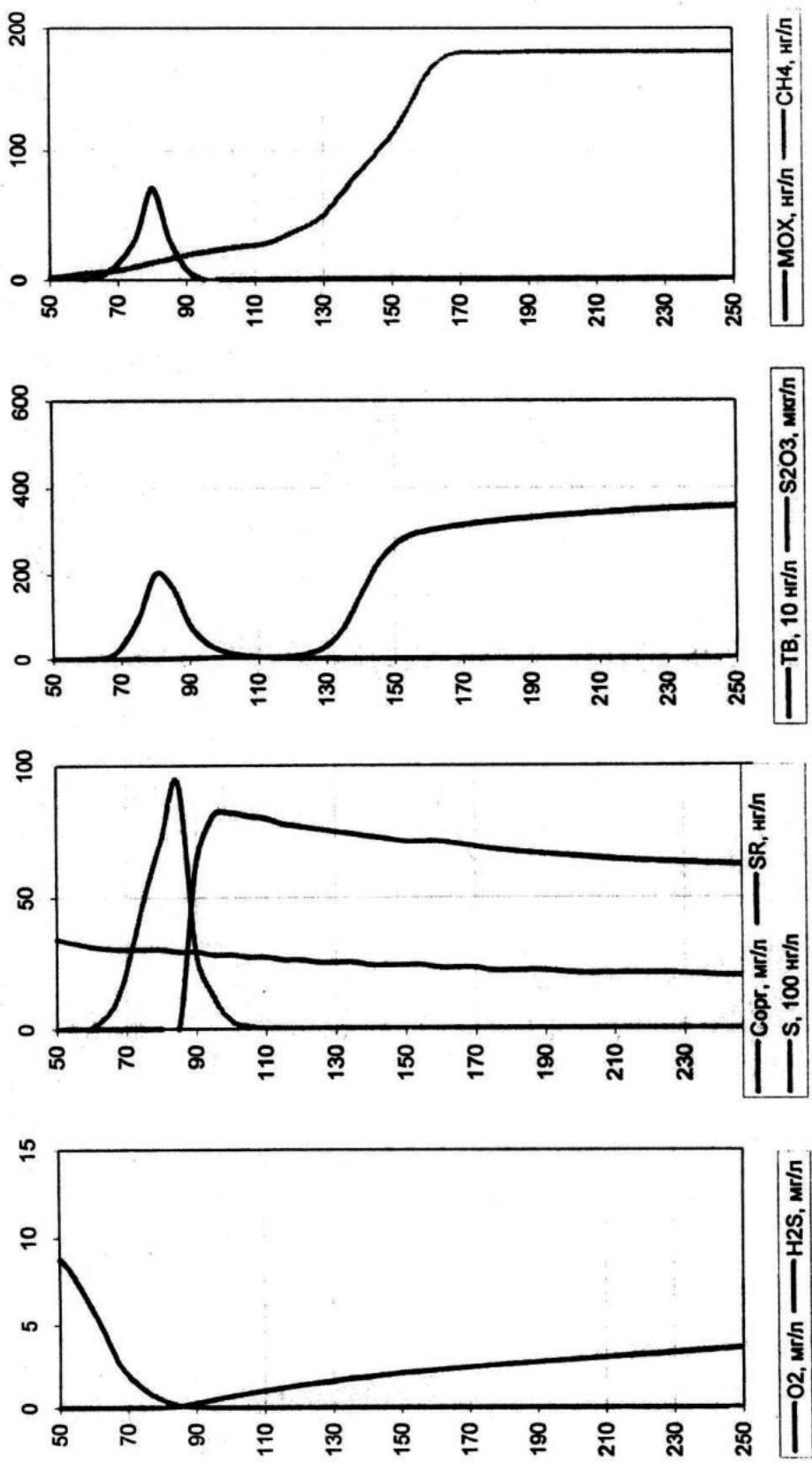


Рис.2. Модельные распределения компонент экосистемы в хемоклине центральной зоны

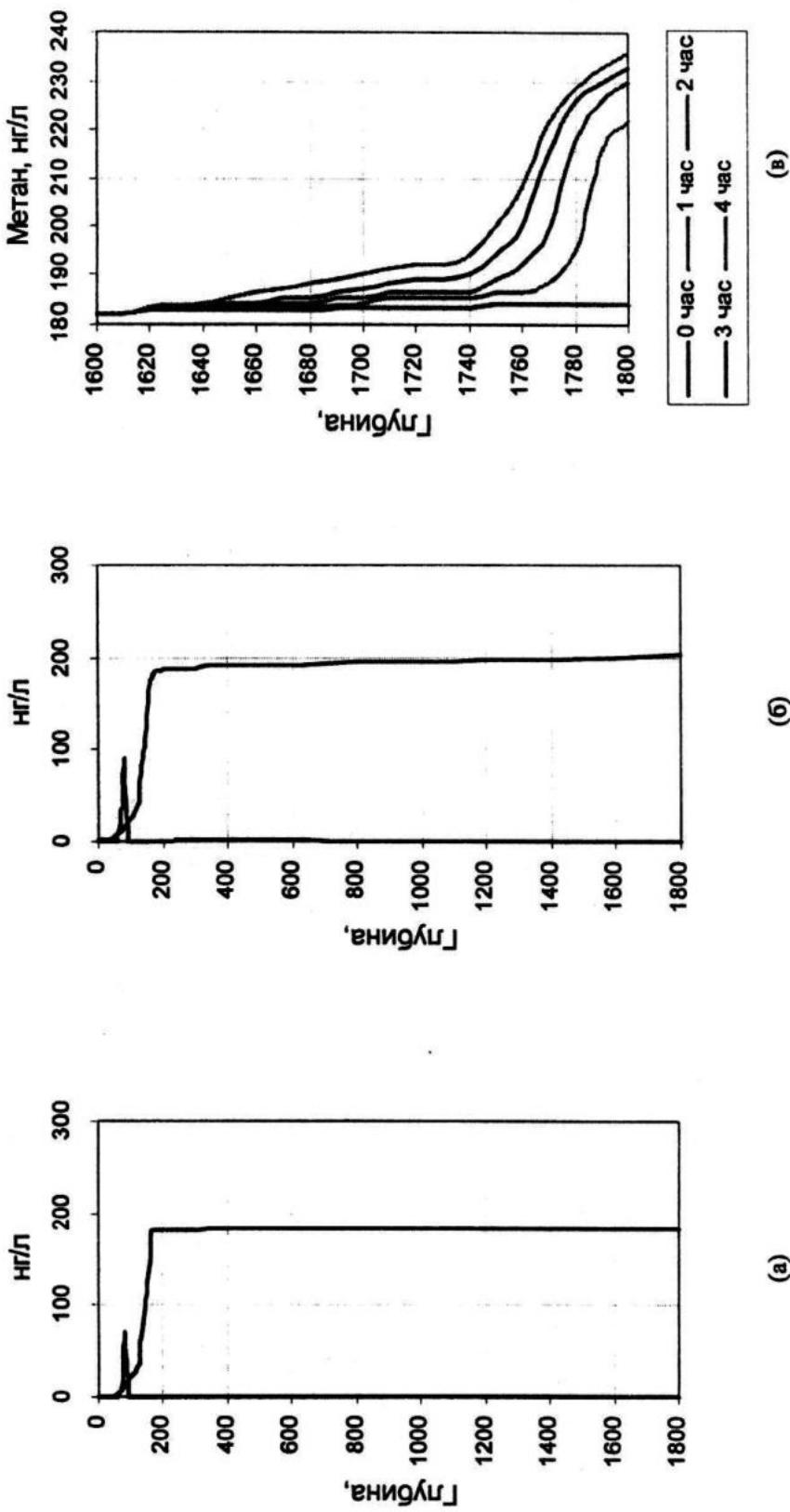


Рис.3. Результаты численных экспериментов. Климатическое распределение от фонового донного биогенного источника на дне (а). Стационарное распределение от слабого донного экзогенного источника (б). Нестационарные распределения от сильного ("аварийного") донного источника (в).

медленно движется вверх. Имеет место се пространственно-временная диссипация. Концентрация метана в верхних слоях значительно возрастает, что ведет к небольшому увеличению биомассы метанокисляющих бактерий. Результатирующий поток метана в атмосферу увеличивается на 2-4%. Примерно на 6-ые сутки после «включения источника» пемного (с 18 до 20 нг/л в центральной зоне, с 40 до 44 нг/л в промежуточной зоне и с 52 до 58 нг/л в периферийной зоне) увеличивается концентрация сульфатредукторов у дна, которая приводит к значительному увеличению продукции сероводорода. Концентрация сероводорода в мг/л увеличивается во втором зонке после запятой. Концентрация остальных компонент экосистемы остается неизменной.

Таким образом, расчеты в рамках представленной модели показали, что стационарный источник метана с мощностью, на порядок превосходящей естественный, а также кратковременный (менее 4 часов), превосходящий ону на 2-3 порядка, не оказывают значительного влияния на экосистему сероводородной зоны Черного моря.

Учитывая то, что цикл метана составляет лишь 0,3% в бюджете углерода в Черном море, а также, что любой эндогенный источник метана можно рассматривать как дополнительный источник углерода, приведем результаты численного эксперимента, проведенного ранее [3]. Исследовался «отклик» экосистемы на увеличение фотосинтетического потока углерода, т.е. на эвтрофикацию. При этом поток взвешенного органического углерода сверху увеличивался в два раза. Был поток 200, 400, 800 мгС/(м² сут), стал поток 400, 800, 1600 мгС/(м² сут) для центральной, промежуточной и периферийной зон соответственно. Решалась стационарная задача. Сравним некоторые характеристики экстремумов найденных распределений, а также некоторые потоки. Прежде всего, увеличение потока ведет к подъему хемоклина, росту концентрации сероводорода и расширению сероводородной зоны. Интегральная скорость сульфатредукции увеличивается, интегральная скорость окисления сероводорода уменьшается. Распределения восстановленных соединений серы меняются сложным образом: концентрация тиосульфатов возрастает, концентрация молекуллярной серы уменьшается в центре и увеличивается на периферии. Растут, особенно на периферии концентрации всех бактерий. Отсюда, можно сделать заключение, что если:

- Поток метана на три порядка превысит естественный,

- Источник метана такой мощности будет стационарным,
- Метан, благодаря утилизации сульфатредукторами, будет активно вовлечен в производственный цикл углерода в экосистеме, то отклик экосистемы будет описываться изменившимся, которая гораздо меньше климатической. Причиной этого является исключительная консервативность сероводородной зоны Черного моря.

Таким образом, наши расчеты показали, что при аварии на газопроводе в глубинной части моря в условиях сероводородной зоны (максимальные глубины прокладки газопровода 2150 м) стационарный источник с мощностью, на порядок превосходящей естественный фон, а также кратковременный (менее 4-ех часов), превосходящий естественный на 2-3 порядка, не оказывает значительного влияния на параметры экосистемы сероводородной зоны моря. Воздействие выброса не опускается выше, чем 180 м от дна. Незначительно возрастает концентрация метана в верхних слоях моря, что, как показали численные эксперименты на модели ведет к небольшому увеличению биомассы метанокисляющих бактерий и увеличивает результатирующий поток метана в атмосферу на 2-4%. На модели также рассчитаны все параметры экосистемы при увеличении первичной продукции фотической зоны в два раза, чего в настоящее время пока не наблюдается, но в будущем может иметь место в результате эвтрофирования моря. Расчеты показали, что даже такое значительное увеличение потока углерода приведет к поднятию сероводородной зоны только на 5-7 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сога Е.Е., Любарцева С.П. Использование математического моделирования для прогноза состояния экосистемы сероводородной зоны Черного моря при реализации технических проектов // В сб. Системы контроля окружающей среды, Севастополь, МГИ НАН Украины, 2001, С. 363-368.
2. Беляев В.И., Сога Е.Е. Математическая модель экосистемы сероводородной зоны Черного моря. Мор. гидрофиз. журн. - 1991. - № 6. - с. 42-54.
3. Беляев В.И., Сога Е.Е., Любарцева С.П. Анализ влияния потоков органического вещества из аэробной зоны на состояние экосистемы сероводородной зоны Черного моря // В сб. "Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суша-море" Севастополь, МГИ НАН Украины. 1997, с.15.