

Роль геотермального тепла в формировании потока сероводорода из глубин Черного моря

Получена оценка вертикального потока сероводорода в придонном слое моря, обусловленного тепловой конвекцией у дна. Показано, что поток геотермального тепла через дно величиной 30 мВт/м^2 вызывает поток сероводорода приблизительно $100 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сут.}$ Сделан вывод о том, что аномалия теплового потока вблизи Южного берега Крыма неплохо совпадает с положением пятна дефицита кислорода вблизи верхней границы сероводородной зоны. Примерно здесь же прослеживается минимальная концентрация растворенного сероводорода в придонном слое воды. Таким образом, распределение сероводорода и других химических веществ может коррелировать с геологическими структурами на дне и связано не только с развитием придонной конвекции, но и с поступлением этих веществ через разломы.

Воды Черного моря ниже изобаты 1000 м хорошо перемешаны по вертикали, что выражается в профилях температуры, солёности и сероводорода (рис. 1). В литературе [1, 3] это связывается с придонной конвекцией, обусловленной поступлением геотермального тепла со дна моря. Эта гипотеза подтверждается, например, положительным градиентом температуры по глубине в придонных водах. В предлагаемой работе получена количественная оценка влияния геотермальных потоков на вертикальную адвекцию и оценивается их вклад в вертикальный перенос сероводорода.

По оценкам С. Г. Богуславского, средний вертикальный градиент потенциальной температуры в слое придонной конвекции равен $0,728 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/м}$ [1]. Градиент солёности в слое 1000—2000 м тоже очень мал, перепад солёности на границах слоя составляет лишь несколько сотых промилле. Следовательно, сообщение жидкой частице у дна дополнительной плавучести всего 10^{-5} г/л , позволит ей достичь верхней границы слоя конвективного перемешивания. По величине теплового потока через дно можно рассчитать поток плавучести и оценить, какой объем жидкости за единицу времени прогревается над участком дна единичной площади на $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, что позволяет ему участвовать в конвективном перемешивании. Коэффициент объемного теплового расширения морской воды при температуре $9 \text{ }^\circ\text{C}$ равен $0,7 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Поэтому изменение температуры жидкости на $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ сопровождается уменьшением плотности воды на величину около 10^{-5} г/л [7].

Пусть поток тепла через дно будет Q . Карта таких потоков для глубоководной части Черного моря приведена на рис. 2. Она получена измерением градиента температуры в слое осадков [6] и осреднением результатов по одноградусным квадратам. Среднее значение Q по котловине составляет около 30 мВт/м^2 , что соответствует нагреванию за сутки на $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ слоя воды толщиной 0,6 см. При концентрации сероводорода в глубинных водах $0,4 \text{ ммоль/л}$ [2] это соответствует потоку сероводорода, определяемому по формуле:

$$q = \left(\frac{Q}{C \Delta T} \right) \cdot C_{\text{H}_2\text{S}}, \quad (1)$$

где $C = 1 \text{ кал/г} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ — теплоемкость воды; $\Delta T = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ — изменение температуры, необходимое для преодоления плотностной стратификации; $C_{\text{H}_2\text{S}}$ — концентрация сероводорода у дна. При подстановке численных значений получаем q , равное $2,5 \text{ ммоль/м}^2 \cdot \text{сут.}$ На самом деле вынос сероводорода из глубин определяется разностью между восходящими и нисходящими потоками сероводорода, т. е. результирующее значение будет заведомо меньше q .

Различные оценки потока сероводорода вблизи верхней границы сероводородной зоны дают для него значения $240\text{—}1100 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сут}$ [2]. Полученное нами значение соответствует $90 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сут}$, что близко к

минимальным оценкам по скорости окисления сероводорода. Как и следовало ожидать, оценка восходящего потока сероводорода в несколько раз превышает его турбулентный поток, который рассчитан по градиенту концентрации сероводорода в глубинных водах и коэффициенту вертикальной турбулентной диффузии, равному $1 \text{ см}^2/\text{с}$. В целом же по порядку величины полученная оценка согласуется с результатами других расчетов [2, 5].

Заметим, что толщина придонного слоя конвекции не входит в выражение (1). По всей вероятности, она определяется существованием на горизонте 1000 м мощного противотечения с антициклоническими круговоротами, на существование которого в замкнутых морях указывал еще В. В. Экман [3]. Заглубление вод под действием силы Кориолиса препятствует распространению конвекции в залегающие выше слои, где вертикальный поток сероводорода обусловлен исключительно турбулентной диффузией. В связи с этим градиент концентрации сероводорода выше горизонта 1000 м заметно возрастает. Такая схема переноса сероводорода частично подтверждается

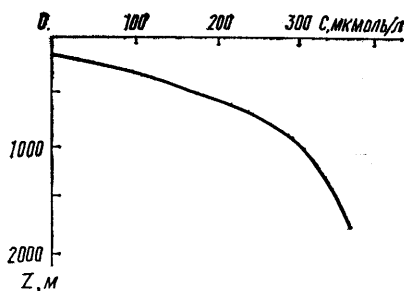


Рис. 1. Типичный профиль концентрации сероводорода в Черном море

немонотонностью изменения с глубиной концентрации сероводорода в слое 1200—2000 м. Несмотря на плавное изменение средней концентрации с глубиной, результаты измерений на соседних горизонтах нередко

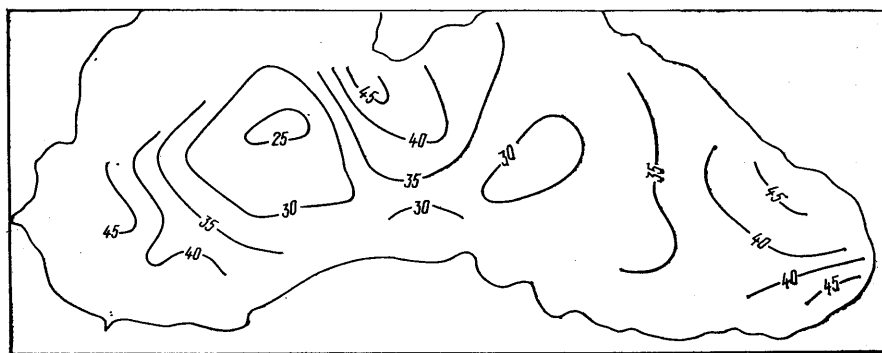


Рис. 2. Карта изолиний теплового потока ($\text{мВт}/\text{м}^2$) через дно Черного моря

отличаются на 10 % в ту или иную сторону. С точки зрения конвективного механизма, это соответствует попаданию батометров в разные области конвективной ячейки.

Как следует из выражения (1), поток сероводорода пропорционален тепловому потоку на дне. В связи с этим можно ожидать, что зоны максимального теплового потока проявляются в виде максимумов в распределении сероводорода на фиксированных горизонтах. В свою очередь эти максимумы могут проявляться в распределении кислорода вблизи верхней границы сероводородной зоны. В работе [4] показано, что в слое 70—90 м хорошо выделяется одноградусный квадрат с повышенным дефицитом кислорода в течение всего года. Расположение и размеры аномального участка хорошо совпадают с аномалией теплового потока вблизи Южного берега Крыма (рис. 1).

Таким образом, геологические особенности строения дна Черного моря проявляются в картине сероводородного заражения моря не в результате выноса сероводорода через дно, а как регулятор интенсивности придонной конвекции. Причем сами гидротермы тоже влияют

на интенсивность вертикального перемешивания, вынося большое количество относительно горячей воды в придонный слой. Концентрация сероводорода в придонном слое в месте повышенного теплового потока может быть ниже фоновой вследствие усиленного оттока воды, что характерно для отмеченного выше одноградусного квадрата.

1. Альтман Е. Н., Безбородов А. А., Богатова Ю. И. Практическая экология морских регионов: Черное море.— Киев: Наук. думка, 1990.—252 с.
2. Беляев В. И. Моделирование морских систем.— Киев: Наук. думка, 1987.—204 с.
3. Водяницкий В. А. Основной водообмен и история формирования солёности Черного моря // Тр. Севастоп. биол. ст.—1948.—№ 6.—С. 386—431.
4. Еремеева Л. В., Дегтерев А. Х. Изменчивость дефицита кислорода вблизи сероводородной зоны Черного моря // Мор. гидрофиз. журн.—1993.—№ 2.—С. 62—64.
5. Еремеева Л. В., Дегтерев А. Х., Дегтерев О. Х. Диагноз сероводородного заражения Черного моря по газообмену с атмосферой // Метеорология и гидрология.—1991.—№ 2.—С. 80—83.
6. Кобзарь В. М. Геотермическая модель литосферы Черноморской впадины.— Севастополь, 1983.—25 с.—Деп. в ВИНТИ 27.10.83, № 3181.
7. Попов Н. И., Федоров К. Н., Орлов В. М. Морская вода.— М.: Наука, 1979.—328 с.

Мор. гидрофиз. ин-т АН Украины,
Севастополь

Статья поступила
13.12.91

Резюме

Одержано оцінку вертикального потоку сірководню в придонному шарі моря, зумовленого тепловою конвекцією біля дна. Показано, що потік геотермального тепла через дно величиною 30 мВт/м² викликає потік сірководню приблизно 100 мг/м²·добу. Зроблено висновок про те, що аномалія теплового потоку біля Південного берега Криму непогано збігається з положенням плями дефіциту кисню поблизу верхньої межі сірководневої зони. Десь тут простежується мінімальна концентрація розчиненого сірководню в придонному шарі води. Таким чином, розподіл сірководню та інших хімічних речовин може корелювати з геологічними структурами на дні і пов'язаний не тільки з розвитком придонної конвекції, а й з надходженням цих речовин через розломи.

Summary

The vertical flow of hydrogen sulphide in the near-bottom layer of the sea caused by thermal convection near the bottom has been estimated. It is shown that the geothermal heat flux through the bottom measuring 30 mW/m² induces the flow of hydrogen sulphide of the order of 100 mg/m² day. It has been concluded that anomaly of the thermal flux near the southern shore of the Crimea coincides well with the position of oxygen deficit spot near the upper boundary of the hydrogen-sulphide zone. Approximately here a minimum of the dissolved hydrogen sulphide concentration in the near-bottom water layer is observed. Thus, the distribution of hydrogen sulphide and other chemical substances can correlate with geological structures on the bottom in connection with not only the arrival of these substances through the fractures but also with the development of the near-bottom convection.