

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКА ЗАМОРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ВОДОЁМАХ, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ЭВТРОФИРОВАНИЮ

Селютин В.В.¹, Шабас И.Н.¹, Кулыгин В.В.²

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

vvs1812@gmail.com; shabas@sfedu.ru

²Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

kulygin@ssc-ras.ru

Аннотация: Рассматривается проблема моделирования кислородного режима мелководных водоёмов. Обращается внимание на имеющиеся здесь принципиальные трудности и предлагается способ их преодоления в виде построения системы редуцированных моделей. Излагается подход к оценке риска гипоксии, основанный на сценарных расчётах.

Концентрация растворённого кислорода (РК) является одной из важнейших характеристик качества вод, так как от неё зависит жизнь практически всей гидрофауны, а также направление и скорость большинства биохимических процессов. По этой причине мониторинг и исследование особенностей кислородного режима являются одним из важных направлений гидроэкологических исследований. Особую актуальность моделирование и прогнозирование кислородного режима играет в подвергающихся антропогенному эвтрофированию относительно мелководных водоёмах и на морском шельфе, где нередко возникают явления гипоксии и аноксии, вызывающие заморы.

Несмотря на то, что основные принципы и закономерности формирования кислородного режима хорошо известны, его моделирование и прогнозирование представляет серьёзную трудность. Это связано с тем, что кислородный режим есть результат совместного действия разнообразных биологических, физических и химических процессов, а концентрация РК весьма изменчива как во времени, так и в пространстве.

Основными из этих процессов являются газообмен с атмосферой; первичная продукция автотрофов (фотосинтез); гетеротрофное дыхание, включая бактериальную деструкцию органического вещества; биохимическое потребление кислорода илами, включая окисление восстановленных форм углерода, азота и серы; перенос и диффузия растворённых и взвешенных веществ. При этом указанные процессы зависят от множества экзогенных физикохимических факторов, таких как ветровая активность, солнечная радиация и температура вводы, общая минерализация, пресный сток, внутренний водообмен, наличие ледяного покрова и поверхностных плёнок и пр.

Насыщение (временами - пересыщение) воды кислородом происходит в поверхностном слое, а его потребление – в толще вод и в придонном слое. В результате, распределение концентрации РК по вертикали имеет выраженный отрицательный градиент, если отсчёт глубины вести от поверхности водоёма. Основным уравнением, описывающим вертикальное распределение РК, является

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(t, z) \frac{\partial q}{\partial z} \right) + p(t, z) - k(\theta, q)Y, \quad 0 < z < H; \quad (1)$$

где $q(t, z)$ - концентрация РК; $Y(t, z)$ - концентрация лабильного органического вещества (ЛОВ), выраженная в единицах кислорода; $p(t, z)$ – вертикальное распределение интенсивности фотосинтеза; $D(t, z)$ - коэффициент вертикальной диффузии; $k(\theta, q)$ - скорость окисления ЛОВ, зависящая от температуры $\theta(t)$ и концентрации кислорода $q(t, z)$; H - глубина рассматриваемого участка водоёма.

При этом дополнительные уравнения к модели (1), описывающие динамику первичной продукции, биогенных элементов, растворённого и взвешенного органического вещества, а также соответствующие граничные условия, могут задаваться различными

способами в зависимости от целей исследования и возможностей информационного обеспечения модели. От этого же, а также от особенностей конкретного водоёма, зависит и то, в какой постановке конструировать модель – в одномерной, 2-х мерной или 3-х мерной.

Для оценочных расчётов в случае мелководных водоёмов может использоваться простое аналитическое решение модели (1), которое имеет вид

$$q(t, z) = q_s(\theta(t)) - \eta(H) \frac{P(t - \tau)z^2}{2D(W(t))H} \quad (2)$$

где управляющими функциями являются первичная продукция на единицу площади $P(t)$, температура воды в поверхностном слое $\theta(t)$ и скорость ветра над поверхностью воды $W(t)$. $\eta(H)$ – доля первичной продукции, поступающая в донные отложения при осаждении взвешенного органического вещества, а τ отражает эффект запаздывания.

При выводе формулы (2) предполагаются однородность вертикального распределения первичной продукции $p(z)$ и квазистационарность экзогенных факторов.

Исходя из того, что в водных экосистемах протекают процессы с широким спектром характерных времён (от нескольких часов до нескольких лет) и при моделировании неизбежно либо агрегирование компонентов, либо редукция, либо и то, и другое вместе, можно выделить малые безразмерные параметры, что позволяет в первом приближении расщепить исходную общую модель на систему более простых, редуцированных моделей, идентифицировать, исследовать и интерпретировать которые значительно легче.

Если зафиксировать некоторый уровень воды h , то по результатам сценарных расчётов на выходе модели мы получаем значения концентраций $q(t, z; H(h))$ для точек с разными глубинами дна H (зависящими от уровня воды h) в разных районах водоёма и на различных горизонтах $0 \leq z \leq H$. Аналогично можно получать и другие условные распределения, а также безусловные распределение (предполагая, что уровень воды также изменится в расчётный период).

Задавая, в частности, определённый район, период времени, горизонт, уровень воды и расстояние до дна в контрольном пункте (или локальное распределение глубин в районе), в результате расчётов получаем множество значений концентраций РК. Ранжированная по возрастанию последовательность этих значений является модельной функцией распределения $P(O_2 \leq q | h, z) = F_h(q)$ (для района) или $P(O_2 \leq q | H, z) = F_H(q)$ (для пункта с глубиной H), где $P(O_2 \leq q | h, z)$ – вероятность (частота) того, что концентрация кислорода O_2 не будет превышать величину q на горизонте z при некотором уровне воды h в выделенном районе в заданный период времени, $P(O_2 \leq q | H, z)$ – вероятность (частота) того, что концентрация кислорода O_2 не будет превышать величину q на горизонте z в пункте с глубиной H в заданный период времени, $F_h(q)$, $F_H(q)$ – соответствующие условные функции распределения концентрации кислорода.

Модельные функции распределения позволяют рассчитать различные показатели риска. Риск гипоксии может оцениваться либо как частота (вероятность) ψ возникновения ситуаций снижения концентрации кислорода на определённых глубинах z ниже некоторого установленного критического порога $P(O_2(z) \leq O_{2кр}) = \psi$, либо как произведение вероятности гипоксии на среднее значение дефицита, то есть ожидаемый дефицит кислорода $E\{D\} = MD \times \psi$, где $D = \max\{0, O_{2кр} - O_2(z)\}$ – случайная величина дефицита кислорода, $MD = E\{O_{2кр} - O_2(z) | O_2(z) \leq O_{2кр}\}$ – средний дефицит РК.

Работа выполнена в рамках проекта № 1.5169.2017/8.9 "Фундаментальные и прикладные задачи математического моделирования" базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ.