

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СОЛЕНОГО ОЗЕРА*

БЕЛОЛИПЕЦКИЙ В.М., ГЕНОВА С.Н.
г. Красноярск, ИВМ СО РАН, СФУ
e-mail: belolip@icm.krasn.ru

ДЕГЕРМЕНДЖИ А.Г., РОГОЗИН Д.Ю.
г. Красноярск, Институт биофизики СО РАН

Предлагается модификация одномерной в вертикальном направлении модели температурного и солевого режимов озера, учитывающая изменение глубины водоема. Приводятся примеры расчетов для озер Шира и Шунет и сравнение с данными натуральных измерений.

1. Одномерная в вертикальном направлении модель соленого озера

Вертикальные распределения температуры и солености воды в глубоководной зоне в различные сезоны можно определить по одномерной модели, предложенной в работах [1, 2]. Одномерная модель для периода отсутствия ледяного покрова основывается на решении одномерных в вертикальном направлении уравнений диффузии относительно температуры и солености воды. Коэффициент вертикального турбулентного обмена определяется по формуле Прандтля – Обухова с учетом приближения Экмана. Тепловой поток на водной поверхности вычисляется по известным эмпирическим формулам.

В зимний период по вертикали выделяются слой льда, слой конвективного перемешивания и придонный слой. Для определения динамики толщины ледяного покрова применяется упрощенная модель, основанная на квазистационарном температурном режиме в затвердевшей области. В соленых озерах при образовании льда в результате кристаллизации воды высвобождается соль. Формируется неустойчивая плотностная стратификация, приводящая к интенсивной вертикальной циркуляции и образованию слоя конвективного перемешивания. В этом слое происходит выравнивание температуры и солености. Уравнение состояния соленой воды принимается в приближении Буссинеска, (плотность линейно зависит от температуры и солености воды). Предполагается, что конвективное перемешивание распространяется до такого горизонта, на котором плотность воды становится равной плотности подстилающего слоя воды. Так как в зимний период температура воды мало изменяется по глубине, то плотность воды в основном зависит от солености. С учетом этих предположений выведены расчетные формулы для определения глубины распространения конвекции и значений температуры, солености, плотности воды в конвективном слое.

Выполнена модификация одномерной модели, учитывающая изменение глубины озера в летний период. Весной температура льда повышается до температуры фазового перехода и происходит таяние ледяного покрова как снизу, так и сверху. После

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-05-00552) и междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 95-2009.

таяния льда образуется слой опресненной воды, который под воздействием ветра перемешивается с нижними слоями воды.

2. Модификация одномерной модели

2.1. Период отсутствия ледяного покрова.

Вертикальные распределения температуры и солёности в глубоководной области озера определяются из одномерного уравнения диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial C}{\partial z} \right) + f, \quad (1)$$

здесь t – время, z – вертикальная координата, направленная вниз, H – глубина озера, K – коэффициент вертикального турбулентного обмена, $C(t, z)$ – температура T (солёность S) воды, $f(t, z)$ – внутренние источники.

Граничные условия

$$K \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} = -F_C, \quad K \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=H} = -F_{CH} \quad (\text{или } C|_{z=H} = C_H), \quad (2)$$

начальное условие

$$C(0, z) = C_0(z). \quad (3)$$

2.2. Зимний период.

Толщина слоя конвективного перемешивания определяется с учетом объема замерзшей воды. Так как в зимний период плотностная стратификация под ледяным покровом, в основном, зависит от солёности воды, то изменение солёности воды в слое конвективного перемешивания на временном шаге $\Delta t = t^{n+1} - t^n$ определяется по формуле

$$\Delta S_k^{n+1} = \frac{(S_k^n - S_w)(\xi_w^{n+1} - \xi_w^n)}{0.5(h^{n+1} + h^n) - \xi_w^{n+1}}, \quad (4)$$

S_k^n – солёность в слое конвективного перемешивания при $t = t^n$, ξ_i^n , ξ_i^{n+1} – толщины льда при $t = t^n$ и $t = t^{n+1}$ соответственно, $\xi_w = \rho_i \xi_i / \rho_w$, $S_w = \rho_w S_i / \rho_i$, S_i – солёность льда, ρ_w – плотность воды, ρ_i – плотность льда, $z = h^n$ и $z = h^{n+1}$ – заглубления слоя конвективного перемешивания при $t = t^n$ и $t = t^{n+1}$ соответственно. Изменение толщины льда рассчитывается с использованием упрощенной модели [1, 2].

Упрощенное уравнение состояния солёной воды

$$\rho(S) = \rho_0(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 T_\bullet / T_0 + \varepsilon_3 S / S_0), \quad (5)$$

Здесь $\rho_0 = 1.0254$ г/см³, $\varepsilon_1 = 0.9753$, $\varepsilon_2 = -0.00317$, $\varepsilon_3 = -0.00007$, $T_0 = 17.5^\circ\text{C}$, $S_0 = 35^\circ/\text{oo}$, T_\bullet – характерное значение температуры.

Заглубление слоя конвективного перемешивания определяется из условия

$$\rho|_{z=h^{n+1}} = \rho(S_k^n + \Delta S), \quad (6)$$

$\rho(S(z))$ – вертикальный профиль плотности перед ледообразованием.

Вертикальные профили солености и температуры воды перед началом ледообразования представляются в виде:

$$S(z) = \begin{cases} \bar{S}, & 0 \leq z \leq h^0, \\ \bar{S} + \gamma_S(z - h^0), & h^0 \leq z \leq z_\bullet, \\ S_{bt}(z), & z_\bullet \leq z \leq H, \end{cases} \quad (7)$$

$$T(z) = \begin{cases} T_{ph}, & 0 \leq z \leq h^0, \\ T_{ph} + \gamma_T(z - h^0), & h^0 \leq z \leq z_\bullet, \\ T_{bt}(z), & z_\bullet \leq z \leq H, \end{cases}$$

Здесь $z = h^0$ – толщина верхнего перемешанного слоя перед ледообразованием, T_{ph} – температура замерзания соленой воды, \bar{S} – соленость воды в поверхностном слое.

Из уравнений (4) – (6) определяются h^{n+1} , S_k^{n+1} , T_k^{n+1} :

$$h^{n+1} = \xi_w^{n+1} + \sqrt{(\xi_w^{n+1})^2 + A^n},$$

$$A^n = \frac{2(S_k^n - S_{ice})(\xi_w^{n+1} - \xi_w^n)}{\gamma_S} + (h^n)^2 - 2\xi_w^{n+1}h^n,$$

$$S_k^{n+1} = S_k^n + \gamma_S(h^{n+1} - h^n), \quad (8)$$

$$T_k^{n+1} = T_{ph} \frac{h^{n+1} - h^n}{h^{n+1} - \xi_w^{n+1}} + T_k^n \frac{h^n - \xi_w^{n+1}}{h^{n+1} - \xi_w^{n+1}} + \frac{2\gamma_T(h^{n+1} + h^n - 2h^0)(h^{n+1} - h^n)}{h^{n+1} - \xi_w^{n+1}}.$$

2.3. Летний период в случае увеличения глубины озера.

Предполагается, что увеличение глубины происходит за счет притока пресной воды. В этом случае средняя соленость в озере уменьшается. Увеличение глубины учитывается добавлением сверху слоя пресной воды толщиной ΔH . Динамика вертикального распределения температуры и солености воды определяется из решения задачи (1) – (3).

2.4. Летний период в случае уменьшения глубины.

Предполагается, что уменьшение глубины связано с превышением испарения над притоком и после испарения вся соль остается в озере. В этом случае средняя соленость в озере возрастает, (при условии постоянства запасов соли в водоеме).

Пусть за летний период глубина озера уменьшится на ΔH . В этом случае при испарении выделится соли (на единицу площади) $\bar{S} \cdot \Delta H$, где \bar{S} – соленость поверхностного слоя. Тогда соленость в слое $\Delta H \leq z \leq 2\Delta H$ изменится на величину $\Delta S = \bar{S}$.

3. Примеры расчетов

Выполнены расчеты динамики вертикальных распределений температуры и солености воды в озерах Ши́ра и Шунет для разных лет. На рис. 1 сравниваются результаты расчетов вертикальных распределений температуры и солености в оз. Ши́ра, на рис. 2 – в оз. Шунет (сплошная линия – расчет, точки – измеренные значения). Результаты расчетов хорошо согласуются с данными натурных измерений. Расчеты для озера Ши́ра показали, что при уменьшении глубины озера слой конвективного перемешивания в зимние периоды может достигать дна.

Описанную математическую модель можно применять для оценки динамики вертикальных распределений температуры и солености воды, учитывающей изменение глубины озера.

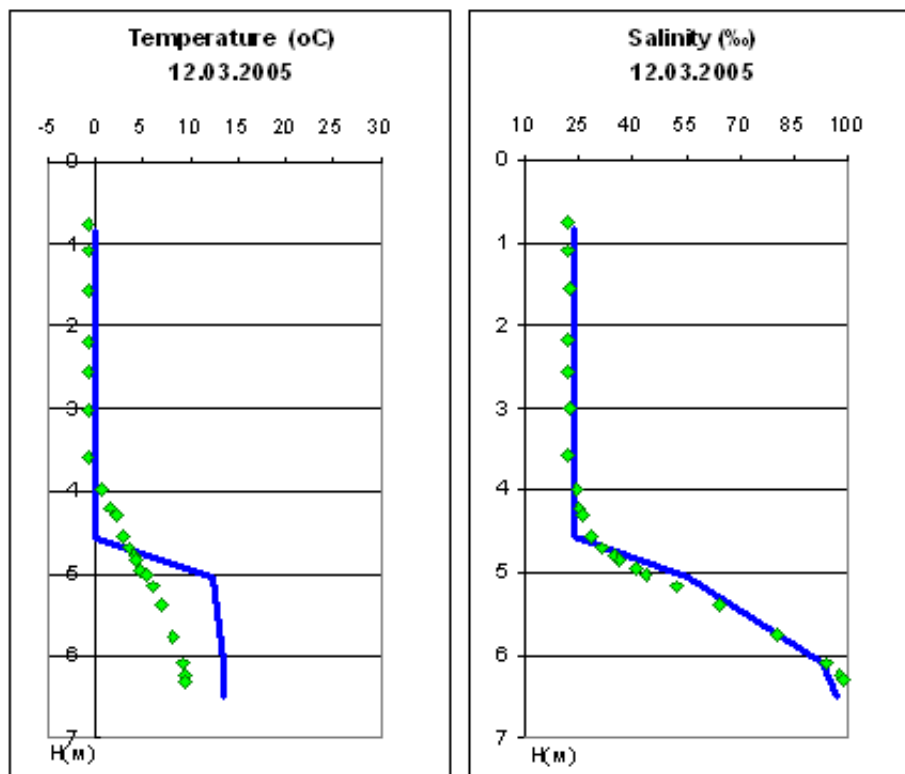


Рис. 1. Вертикальные распределения температуры и солености в озере Шира

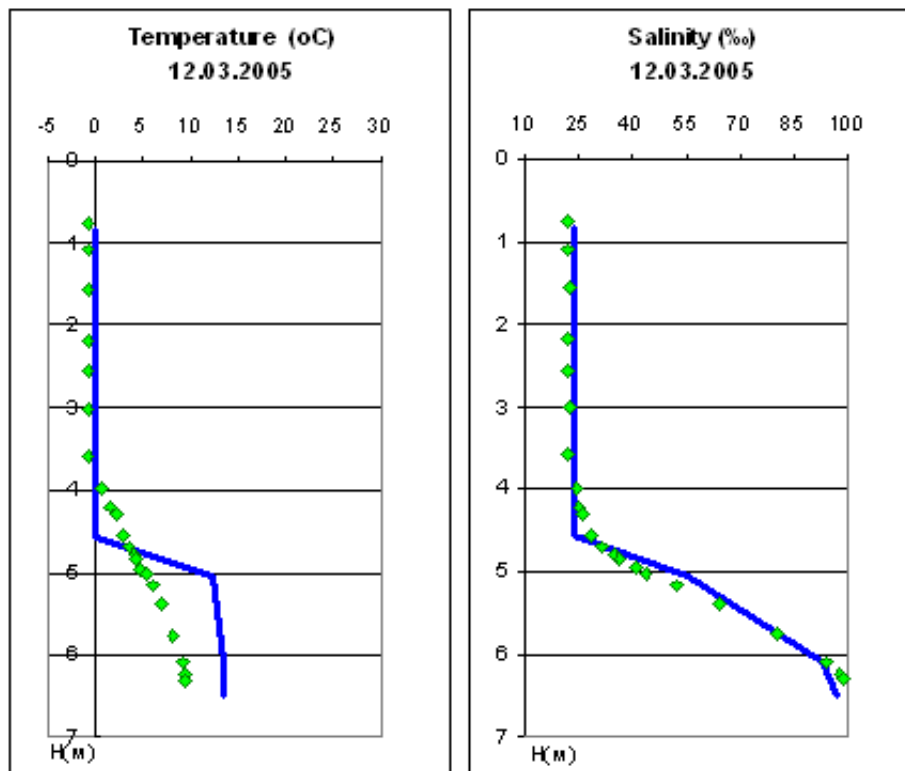


Рис. 2. Вертикальные распределения температуры и солености в озере Шунет

Список литературы

- [1] БЕЛОЛИПЕЦКИЙ В.М., ГЕНОВА С.Н. Численное моделирование годовой динамики вертикальной структуры соленого озера // Вычислительные технологии. 2008. Т.9. №4. С. 34-43.
- [2] GENOVA S.N., BELOLIPETSKII V.M., ROGOZIN D.Y., DEGERMENDZHI A.G. A one-dimensional model of vertical stratification of Lake Shira focussed on winter conditions and ice cover // Aquat Ecol, 2010. 44. P. 571-584.