Результаты численного моделирования взаимодействия атмосферы Земли с поверхностью при наличии снежного покрова

И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, А.И. Мингалев, К.Г. Орлов

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Мурманская обл.

В докладе представлены результаты моделирования взаимодействия атмосферы Земли с поверхностью при наличии снежного покрова. При моделировании учитывается перенос энергии излучения и перенос тепла и влаги в слое снега. В докладе обсуждаются системы уравнений, описывающие перенос влаги и тепла в снежном слое, а также результаты тестовых расчетов одномерной модели

Модель взаимодействия атмосферы с водоемом.

В модели учитываются следующие физические процессы: теплообмен между атмосферой и веществом литосферы за счет молекулярной теплопроводности и турбулентного движения атмосферы в приповерхностном слое (явные потоки тепла), испарение воды, а также конденсация и выпадение осадков (скрытые потоки тепла), поглощение и отражение поверхностью солнечного излучения и теплового излучения атмосферы, испускание поверхностью теплового излучения.

Расчётной величиной является полная внутренняя энергия единицы массы, а не температура. Это сделано по причине того, что нет однозначной связи между внутренней энергией и температурой при температуре 273,15 градуса Кельвина для пресной воды или в зоне гистерезиса для соленой воды, удельная полная внутренняя энергия зависит также и от распределения воды между твердой и жидкой фазой. Кроме этого, для однозначного определения температуры в области гистерезиса важным является предыдущее распределение воды между твердой и жидкой фазой.

Уравнение переноса объёмной плотности внутренней энергии имеет вид

$$\frac{\partial W}{\partial t}+\frac{\partial j}{\partial h}=Q,\quad j=j_{mol}+j_{turb},\quad j_{mol}=-\lambda\frac{\partial T}{\partial h},\quad j_{turb}=v_{turb}\,l_{turb}\frac{\partial W}{\partial h},$$

где $h<0$ – вертикальная координата, t – время, W – объёмная плотность внутренней энергии, j – плотность потока внутренней энергии, λ – коэффициент молекулярной теплопроводности, v_{turb} – скорость, а l_{turb} – длина турбулентного перемешивания, которые для каждого водоема могут быть свои.

Плотность вертикального потока энергии через поверхность воды (положительное направление в верх) задана формулой:

$$J_{pov}=J_{isp}+J_{os}+J_{tepl}+J_{izl}+J_{pad},$$

где: J_{isp} – плотность потока энергии, создаваемая испарением (или конденсацией) воды с поверхности; J_{os} – плотность потока энергии, создаваемая выпадением осадков; J_{tepl} – плотность потока энергии, создаваемая молекулярной и турбулентной теплопроводностью; J_{izl} – плотность потока энергии, создаваемая собственным тепловым излучением поверхности воды; J_{pad} – плотность потока энергии, создаваемая падающим на поверхность воды излучением Солнца и тепловым излучением атмосферы.

Плотность потока энергии, создаваемая испарением воды или конденсацией её паров, описывается следующим уравнением:

$$J_{isp} = v_{турб.пов}\left[W_{пара}\left(T_{pov}\right)\rho_{нас.пар}\left(T_{pov}\right) - W_{атм}\left(T_{атм}\right)\rho_{пар.атм}\right],$$

где: $v_{турб.пов}$ – скорость турбулентного обмена в приповерхностном слое атмосферы, зависит от скорости ветра и шероховатости поверхности; $T_{атм}$ – температура воздуха в приповерхностном слое атмосферы; $W_{пара}\left(T\right)$ – удельная внутренняя энергия единицы массы пара при температуре T в кельвинах; $\rho_{нас.пар}\left(T_{pov}\right)$ – плотность насыщенных паров воды при температуре Т в Кельвинах; $\rho_{пар.атм}$ – плотность паров воды в приповерхностном слое атмосферы.

Плотность потока энергии, создаваемая молекулярной и турбулентной теплопроводностью, описывается уравнением:

$$J_{tepl} = v_{турб.пов..}\rho_{vz} \cdot C_{vz}(T_{pov} - T_{атм}),$$

где: ρ_{vz} – плотность воздуха в приповерхностном слое атмосферы; C_{vz} – теплоёмкость воздуха в приповерхностном слое атмосферы.

Введение этого блока в модель должно обеспечить более точный расчет температуры поверхности Земли и потоков энергии и влаги между атмосферой по сравнению с существующими моделями.

Расчет потоков между атмосферой и водой, льдом и снегом

Плотность вертикального потока энергии через поверхность воды, (положительное направление в верх) задана формулой:

$$J_{pov} = J_{isp} + J_{os} + J_{tepl} + J_{izl} + J_{pad},$$

где: J_{isp} – плотность потока энергии, создаваемая испарением (или конденсацией) воды с поверхности; J_{os} – плотность потока энергии, создаваемая выпадением осадков; J_{tepl} – плотность потока энергии, создаваемая молекулярной и турбулентной теплопроводностью; J_{izl} – плотность потока энергии, создаваемая собственным тепловым излучением поверхности воды; J_{pad} – плотность потока энергии, создаваемая падающим на поверхность воды тепловым излучением Солнца и атмосферы.

Плотность потока энергии, создаваемая испарением воды или конденсацией её паров, описывается следующим уравнением:

$$J_{isp} = v_{turbpov}\left[W_{par}\left(T_{pov}\right)\rho_{npar}\left(T_{pov}\right) - W_{par}\left(T_{atm}\right)\rho_{paratm}\right],$$

где: $v_{turbpov}$ – скорость турбулентного обмена в приповерхностном слое атмосферы, зависит от скорости ветра и шероховатости поверхности; T_{atm} – температура воздуха в приповерхностном слое атмосферы; $W_{par}\left(T\right)$ – удельная внутренняя энергия единицы массы пара при температуре T; $\rho_{npar}\left(T_{pov}\right)$ – плотность насыщенных паров воды при температуре T в Кельвинах ρ_{paratm} –

плотность паров воды в приповерхностном слое атмосферы.

Плотность потока энергии, создаваемая выпадением осадков:

$$J_{os} = \begin{cases} \rho_{vodar} v_{vodos} \left(X_p R_p T_0 - q_{isp}\left(T_0\right) + c_{vod}\left(T - T_0\right)\right), \; T_{atm} > T_0 \\ \rho_{ldar} v_{ldos} \left(X_p R_p T_0 - q_{isp}\left(T_0\right) - q_{pl}^0 + c_l\left(T - T_0\right)\right), \; T_{atm} \le T_0 \end{cases},$$

где: ρ_{vodar} – плотность водных аэрозолей в приповерхностном слое атмосферы, ρ_{ldar} – плотность ледяных аэрозолей в приповерхностном слое атмосферы; v_{vodos} – скорость осаждения водных аэрозолей в приповерхностном слое атмосферы; v_{ldos} – скорость осаждения ледяных аэрозолей в приповерхностном слое атмосферы; c_{ld} и c_{vd}– теплоёмкость льда и воды соответственно.

Плотность потока энергии, создаваемая молекулярной и турбулентной теплопроводностью, описывается уравнением:

$$J_{tepl} = v_{turbpov} \rho_{vz} c_{vz} \left(T_{pov} - T_{atm} \right),$$

где: ρ_{vz} – плотность воздуха в приповерхностном слое атмосферы; c_{vz} – теплоёмкость воздуха в приповерхностном слое атмосферы.

Плотность потока энергии J_{pad}, создаваемая падающим на поверхность воды (снега или льда) излучением Солнца и атмосферы, рассчитывается в радиационном блоке модели общей циркуляции атмосферы Земли. В этом блоке численно решается уравнение переноса излучения в нескольких сотнях (более 700) спектральных каналах на сетке по зенитному углу и по пространству.

Плотность насыщенных паров воды при температуре T в градусах Кельвина описывается следующей эмпирической функцией. При температуре $T < T_0$ эта плотность вычисляется по формуле

$$\rho_{npar}\left(T\right) = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2{,}5 - \frac{c_{vd}}{R_p}} \left(\frac{P_{npv0}}{R_p T}\right) \exp\left[\left(\frac{q_{is}}{R_p} - \left(2{,}5 - \frac{c_{vd}}{R_p}\right) T_0\right) \frac{T - T_0}{T\, T_0}\right],$$

а при температуре $T \ge T_0$ эта плотность вычисляется по формуле

$$\rho_{npar}\left(T\right) = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{5 - \frac{c_{vd}}{R_p}} \left(\frac{P_{npv0}}{R_p T}\right) \exp\left[\left(\frac{q_{is}}{R_p} - \left(5 - \frac{c_{vd}}{R_p}\right) T_0\right) \frac{T - T_0}{T\, T_0}\right],$$

В которых P_{npv0} – давление насыщенных паров воды при температуре T_0.

Расчет потоков энергии и массы в воде, во льду и между льдом и снегом

В данной модели масса литосферы считается постоянной. Из-за такого подхода возникает

необходимость вводить вертикальный поток массы воды, компенсирующий изменения массы литосферы, вызванные испарением воды и осадками. Скорость этого потока воды вычисляется по формуле:

$$v_m = \frac{\left[v_{turbpov} \left(\rho_{npar} \left(T_{pov} \right) - \rho_{paratm} \right) - \rho_{vodar} v_{osvod} \right]}{\rho_{vd}},$$

где: ρ_{vd} – плотность воды.

Эффективный коэффициент турбулентной теплопроводности, характеризующий влияние турбулентного перемешивания воды вычисляется по формуле:

$$\lambda_{turb} = c_{vd} \rho_{vd} v_{turb},$$

где: v_{turb} – характерная скорость турбулентного перемешивания в водоёме на данной глубине.

Именно значение эффективного коэффициента турбулентной теплопроводности отличает описание физических процессов в море, в реке и в озере от болота, где в толще воды турбулентный тепломассообмен отсутствует.

Энергия воды и льда вычисляется по формуле:

$$E_{vn}\left(m, \xi_l, T\right) = m\Big(X_p R_p T_0 - q_{isp}\left(T_0\right) + c_{vod}\left(T - T_0\right)\left(1 - \xi_l\right) + \\ + \xi_l c_l \left(T - T_0\right) - \xi_l q_{pl}^0 \Big),$$

где: m – масса воды или льда, или их смеси; ξ_l – массовая доля льда; $q_{isp}\left(T_0\right)$ – удельная теплота испарения воды при $T_0 = 273{,}15\,\text{K}$; q_{pl}^0 – удельная плавления льда при $T_0 = 273{,}15\,\text{K}$; c_l – удельная теплоёмкость льда; c_{vod} – удельная теплоёмкость воды.

Энергии снега вычисляется по формуле:

$$E_{sn}(H_{sn}, T_{sn}) = E_{vn}\left(\rho_{sn} S H_{sn}, 1, T_{sn}\right),$$

где: ρ_{sn} – плотность снега; H_{sn} – высота снега; T_{sn} – температура снега.

Объёмная плотность полной внутренней энергии снега вычисляется по формуле:

$$W_{sn} = \frac{E_{sn}\left(dz, T_{sn}\right)}{Sdz},$$

В модели озера, моря, болота снег может существовать только при наличии льда. Распределение температуры в снеге принимается линейным. Тогда температура поверхности снега будет $T_{psn} = 2T_{sn} - T\left(0\right),$ где: $T\left(0\right)$ – температура на глубине 0 метров.

Плотность потока энергии от верхней ячейки к снегу, который возникает только за счёт молекулярной теплопроводности снега:

$$J_{sn} = -\lambda_{sn}\left[T_{sn} - T(0)\right]\frac{2}{H_{sn}}$$

Средняя температура снега связанна с плотностью внутренней энергии следующим уравнением, полученным из уравнения:

$$T_{sn}^{n+1} = T_0 + \frac{E_{sn}^{n+1} - m\left(X_p R_p T_0 - q_{isp}(T_0) - q_{pl}(T_0)\right)}{mc_l}.$$

В модели принимается допущение о постоянстве плотности снега и его теплопроводности. Распределение температуры в снеге принимается линейным. Высота снега при отсутствии его таяния, определяется следующим уравнением:

$$\frac{\partial H_{sn}}{\partial t} = \frac{\left[v_{\substack{\text{турб.}\\\text{пов.}}} \cdot \left(\rho_{\substack{\text{нас.}\\\text{пар.}}}(T_{pov}) - \rho_{\substack{\text{пар.}\\\text{атм.}}}\right) - \rho_{\substack{\text{вод.}\\\text{аэр.}}} \cdot v_{\substack{\text{ос.вод.}\\\text{атм.}}}\right]}{\rho_{sn}},$$

где: ρ_{sn} – средняя плотность снега; H_{sn} – толщина слоя снега.

Плотность внутренней энергии снега W_{sn} не может превышать $U_{ld0} \cdot \rho_{sn}$. Таяние и выпадение снега считается по явной схеме, которая приведена в разделе алгоритмов численного решения.

Результаты расчетов

Были проведены тестовые расчеты для разных типов водоемов и при разных параметрах атмосферы. Сначала рассмотрим случай озера с глубиной более 50 метров. В начальный момент был слой льда толщиной 0,5 м, а над ним слой снега толщиной также 0.5 м. Вертикальное распределение температуры воды под льдом в начальный момент было следующий. От минус пятидесяти метров до минус полутора метров вода имела температуру 274 К, для воды от полутора метров глубины до льда температура была задана 273,5 К. Температура льда в начальный момент была задана 272 К, а температура поверхности снега была 272 К. Скорость ветра над поверхностью 0,1 м/с. Температура воздуха была задана 283 К, его влажность – 0,7. На рисунке 1 представлены вертикальные профили температуры воды и приповерхностного слоя льда в озере для моментов времени после начала расчетов 3 часа, 2 суток, 11 суток и 12 суток.

На рисунке 1 видно, что вертикальный профиль температуры на вторые и одиннадцатые сутки практически совпадает. Расчёты показали, что в это время толщина снега и его температура поверхности составляла через три часа 0,4995 метров и 272,74 К, через двое суток 0,465 метров и 273,15 К, через одиннадцать суток 0,293 метра и 273,14 К, через двенадцать суток снег растаял. Температурный профиль оставался практически постоянным со вторых суток до момента окончания таяния льда и снега. После этого момента температура начала меняться гораздо быстрее чем до этого момента. Такое поведение профиля температуры обусловлено тем, что снег и лёд замедляют теплообмен с атмосферой по сравнению со случаем открытой воды. Поскольку в снеге и льде нет потока энергии за счёт турбулентности, которые есть в воде.

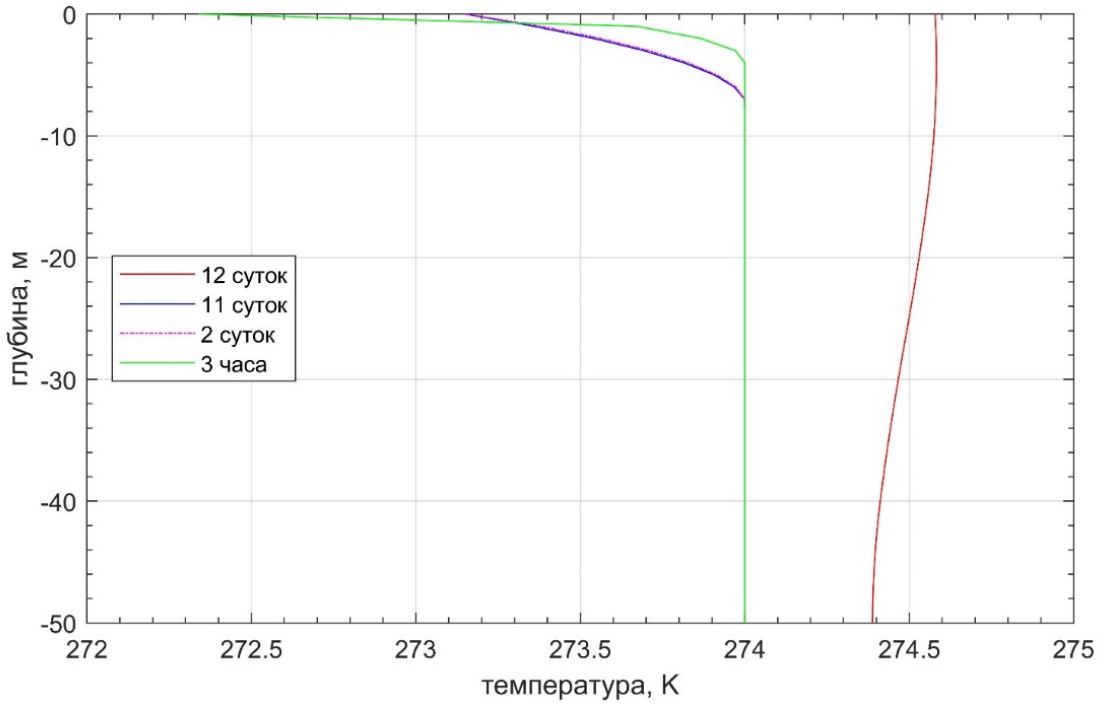

Рис. 1. Вертикальные профили температуры в верхнем слое озера

На рисунке 2 представлены вертикальные профили температуры воды и приповерхностного слоя льда в озере для моментов времени после начала расчетов 3 часа, 6 часов, 7 часов и 7,5 часа для начальных условий, которые отличаются от предыдущего случая тем, что температура воздуха составляет 283 К и тем, что влажность воздуха была 0,7, а также скорость ветра составляла 3 м/с.

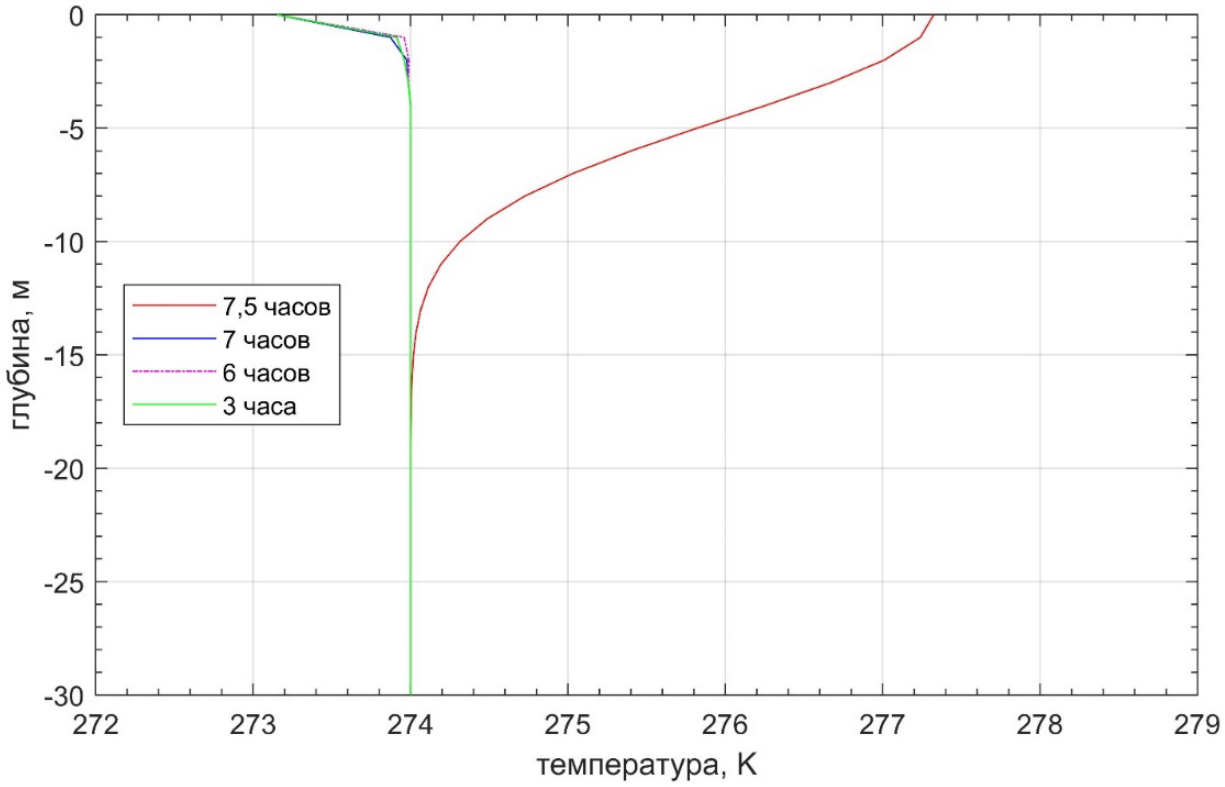

Рис. 2. Вертикальные профили температуры в верхнем слое озера

На рисунке 2 видно, что температурный профиль быстро изменяется во времени, по сравнению с предыдущими случаями. Расчёты показали, что таяние снега и льда шло интенсивнее чем в случаях, рассмотренных выше. Температура поверхности снега и его толщина составляли через 3 часа 273,15 К и 0,38 метра, через 6 часов 273,15 К и 0,252 метра, через 7 часов 273,15 К и 0,21 метра, через 7,5 часа снег и лёд уже растаяли, температура поверхности воды составляла 277,32 К. Таким образом, в таких условиях снег тает очень интенсивно, за счет того, что при сильном ветре поток энергии от атмосферы интенсифицируется. Таким образом видно, что скорость ветра очень существенно влияет на интенсивность тепломассообмена атмосферы с литосферой.

На рисунке 3 представлены вертикальные профили температуры воды и образовавшегося приповерхностного слоя льда в болоте для моментов времени после начала расчетов 20 часов, 30 часов, 60 часов, 90 часов и 120 часов для следующих начальных условий. Начальная температура воды составляет 278,15 Кельвинов, влажность воздуха была 0,7. Шаг сетки 10 см, шаг по времени 1 с.

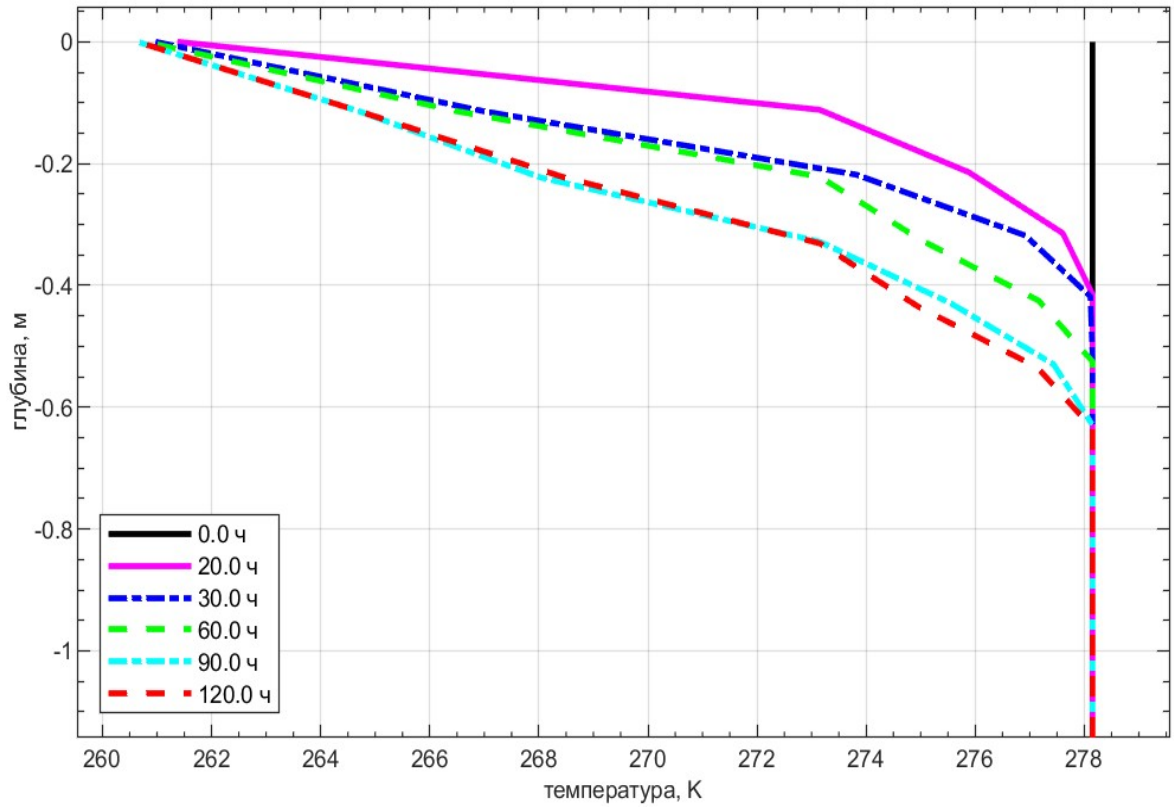

Рис. 3. Вертикальные профили температуры в верхнем слое болота

На рисунке 3 видно, что температурный профиль изменяется достаточно медленно и намерзание льда замедляется по мере увеличения толщины льда. На 120-ом часу толщина льда была 33,1 см и температурой поверхности 260,64 К. Разница с температурой воздуха составляет около 0,64 К, что и обуславливает замедление замерзания льда.

На рисунке 4 представлены вертикальные профили температуры воды и образовавшегося приповерхностного слоя льда в озере с учетом гистерезиса для моментов времени после начала расчетов 0,5 часа, 1 час, 2,5 часа, 5 часов и 120 часов для следующих начальных условий. Скорость турбулентного перемешивания взята равной 0,0001м/с. Начальная Температура воды составляет 278,15 Кельвинов, влажность воздуха была 0,7. Шаг сетки 10 см.

На рисунке 4 видно, что температурный профиль изменяется достаточно быстро и что намерзание льда замедляется по мере увеличения толщины льда. На 2,5-м часу лед только начал образовываться, а к 5-му часу толщина льда вышла, к стационарной для этих условий толщине в 5

см. На 120-м часу температура поверхности была 261,1 К. Температурные профили на 120-ом часу и 5-часу совпадают.

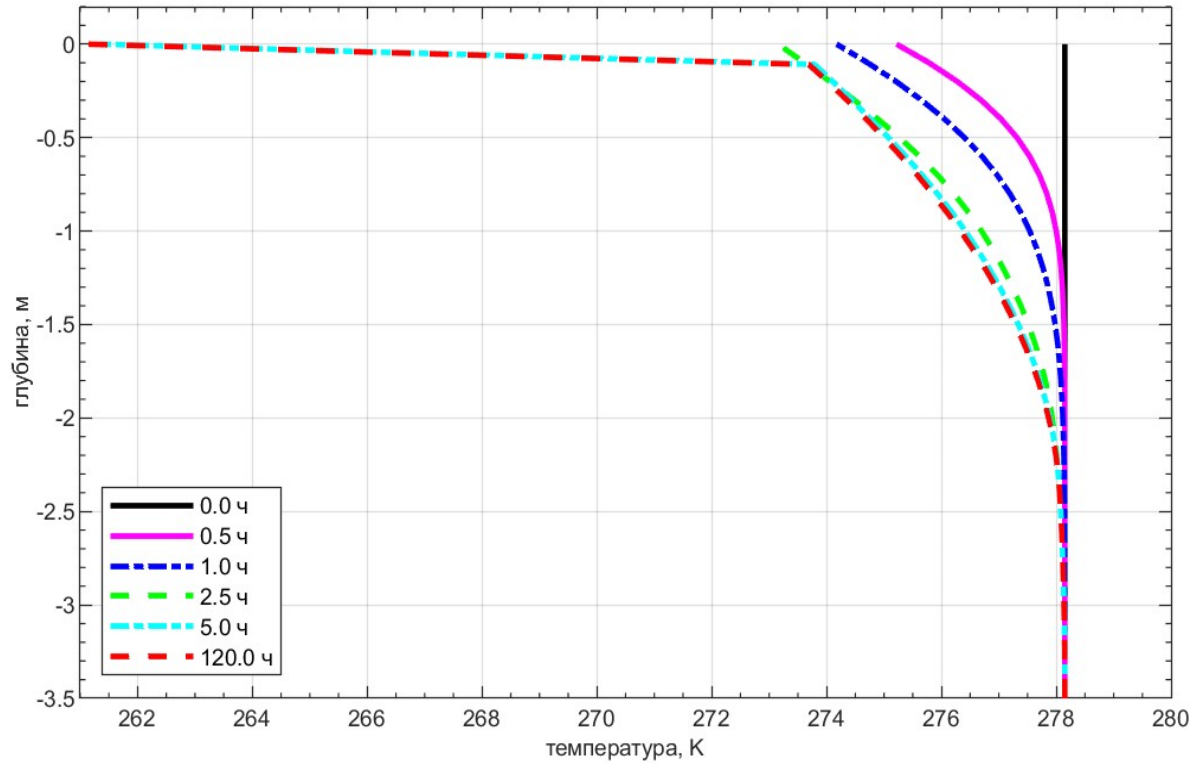

Рис. 4. Вертикальные профили температуры в верхнем слое озера

Выводы

В работе представлена созданная одномерная по пространству численная модель взаимодействия атмосферы с несколькими типами водоемов на поверхности Земли, а именно с поверхностями моря, озера, реки, болота. В этой модели учитывается тепловая инерция верхнего слоя литосферы, поглощение литосферой солнечного излучения, теплового излучение атмосферы и излучение поверхностью литосферы в инфракрасном диапазоне, теплообмен между атмосферой и веществом литосферы за счет молекулярной теплопроводности и турбулентного движения атмосферы в приповерхностном слое. Также в этой модели учитываются процессы испарения воды и конденсации водяного пара и выпадение осадков, создающие поток массы воды и дополнительный поток энергии, а также учитываются процессы накопления снега над замерзшей поверхностью водоемов и таяние накопленного снега.

Представлены результаты тестовых расчетов с помощью созданной модели для различных физических ситуаций. Показано, что созданная модель корректно воспроизводят нагрев и охлаждение приповерхностного слоя моря, озера, реки, болота в разных ситуациях, а также процессы накопления и таяние снега на замерзшей поверхности.

Эта модель обеспечивают более детальный уровень описания физических процессов по сравнению с подходами, использующимися в существующих моделях общей циркуляции атмосферы, созданных ведущими центрами прогноза погоды. Представленная модель предназначена для включения в модель общей циркуляции атмосферы Земли, созданную в Полярном геофизическом институте.