

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА И ДИНАМИКИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ  
В ВОДОЁМАХ СУШИ

(по материалам докторской диссертации)

В.М.Степаненко

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Настоящая работа посвящена созданию новых моделей термодинамических и биогеохимических процессов в водоёмах суши, имеющих значение для климатической системы. Модели должны удовлетворять, помимо адекватности реальным процессам, также требованию вычислительной экономичности – для возможности их включения в модели Земной системы.

В первой части работы перечисляются примеры термодинамического взаимодействия водных объектов с атмосферой, приводящего к развитию экстремальных мезомасштабных метеорологических явлений. Излагаются существующие представления о роли пресноводных систем в глобальном углеродном цикле. Приводится текущее состояние параметризаций водных объектов суши в системах прогноза погоды и моделях Земной системы. Определяются возможности этих параметризаций и ограничения, формулируются задачи исследования.

Вторая часть работы включает формулировку основ одномерного (по вертикали) моделирования озёр и оценку возможностей современных одномерных моделей водоёма в воспроизведении термодинамического режима озёр. Впервые выводятся точные одномерные уравнения термогидродинамики замкнутого водоёма, частными случаями которых являются уравнения, используемые во существующих моделях. Подробно описывается авторская модель водоёма LAKE. Приводятся результаты инициированного автором проекта Lake Model Intercomparison Project (LakeMIP) на примере двух небольших озёр: Коссенблаттер (Германия) и Валькеа-Котинен (Финляндия). Показано, что использование различных турбулентных замыканий в моделях слабо сказывается на температуре поверхности и потоках явного и скрытого тепла в атмосферу. Попутно идентифицируются ограничения метода ковариации пульсаций над озёрами, окружёнными неоднородным ландшафтом. Значительно сильнее модели озера отличаются в расчётном положении термоклина, что имеет существенное значение для воспроизведения биогеохимических процессов. Впервые систематически рассмотрены физические механизмы формирования аномального профиля температуры в озёрах, стратифицированных по солёности, на примере оз. Большой Виллой (Камчатка).

Третья часть работы посвящена параметризации сейшевых колебаний в одномерных моделях. Формулируется новый подход, основанный на явном воспроизведении первой горизонтальной моды внутренних сейш, на долю которой приходится большая часть энергии внутренних волн в озёрах. Проводится аналитическое исследование колебаний в предложенной параметризации. В идеализированных численных экспериментах демонстрируется подавление заглупления сдвигового перемешанного слоя при учёте горизонтального градиента давления. Впервые даётся объяснение, почему в большинстве одномерных моделей включение силы Кориолиса позволяет получать реалистичный сезонный ход вертикального перемешивания при горизонтальных размерах водоёма не сильно меньших радиуса деформации Россби. В расчётах термического режима оз. Валькеа-Котинен ( $L \ll L_R$ ) показано, что параметризация сейш позволяет существенно улучшить результаты моделирования глубины перемешанного слоя.

В четвёртой части приводится описание первой модели динамики в водоёмах суши парниковых газов – метана и углекислого газа. В системе “лёд-вода-донные отложения” учитываются основные процессы генерации и стока  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ , а также их турбулентный перенос в растворённом виде и в составе пузырьков. Валидация модели по концентрации газов и их потоку в атмосферу проводится для двух озёр – оз. Щучье (Северо-Восточная Сибирь) и Куйваярви (Финляндия). Показано, что модель способна адекватно данным измерений воспроизводить сезонный ход вертикального распределения газов и их потоки.

Пятая, заключительная, часть представляет первые результаты включения модели LAKE в модель Земной системы ИВМ РАН.